

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МЕЛЬНИЧУК ГРИГОРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.311.1[621.314:621.318.4]

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART-КОМПЛЕКСІВ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Г.В.Мельничук

Науковий керівник: **Денисюк Сергій Петрович**, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Мельничук Г.В. Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart- комплексів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2021.

У вступі наведено актуальність теми, де розглянуто перспективні напрямки розвитку сучасних електротехнічних комплексів, обґрунтовано доцільність розвитку методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів. Сформовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено дані про апробацію та публікації, окреслено особистий внесок здобувача, наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено огляд сучасних тенденцій розвитку нових технологій локального електроживлення, у тому числі електротехнічних Smart-комплексів, зростання частки електрифікованої критичної інфраструктури, проаналізовано основні тенденції розширення функціональних можливостей електротехнічних комплексів з використанням Smart-технологій у разі живлення різних типів навантажень на змінному та постійному струмі в рамках концепції Smart Grid та Smart City. У цьому розділі визначено загальні підходи до модернізації мереж електроживлення інфраструктури населених пунктів та розвитку електротехнічних Smart-комплексів з урахуванням впровадження сучасних технологій у галузі локальних альтернативних джерел енергії, пристроїв накопичення та збереження енергії, систем силової електроніки, що дало змогу здійснити подальший розвиток концепції формування (побудови) та модернізації чи оптимізації елементів електротехнічних Smart-комплексів, призначених для електроживлення споживачів інтелектуального міста.

У другому розділі проаналізовано основні принципи моделювання

електротехнічних Smart-комплексів шляхом виокремлення еквівалентних генераторів, перетворювачів електроенергії та навантажень, розглянуто особливості роботи сучасних електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами шляхом врахування змін параметрів еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень, визначено основні підходи до формування моделей цих комплексів шляхом визначення кратності роботи еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень і відповідних співвідношень між періодами роботи та параметрами елементів електротехнічних комплексів. Представлено переваги аналітичних методів, зокрема, методу окремих складових, щодо можливості отримання результатів розрахунку в замкненому вигляді та відсутності необхідності визначення початкових умов у разі переходу від одного інтервалу безперервності діючої напруги еквівалентного генератора до іншого.

У третьому розділі отримано аналітичні вирази зображень та оригіналів напруг і струмів у електротехнічних Smart-комплексах з циклічно змінюваними параметрами, проаналізовано особливості аналітичних розрахунків у цих комплексах з модульованими параметрами напруги еквівалентних генераторів шляхом побудови зображень та оригіналів напруги та струмів для аналізу відповідних типів електротехнічних Smart-комплексів, у тому числі з циклічно змінюваними параметрами навантажень. Розвинуто методологію аналізу з використанням методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з періодично (циклічно) змінюваними параметрами генераторів та навантажень, сформульовано алгоритм розрахунку струмів у електротехнічних Smart-комплексах з циклічно змінюваними параметрами та особливості його використання для різних видів базових функцій діючих сигналів генераторів.

У четвертому розділі проаналізовано особливості аналізу електротехнічних Smart-комплексів з нелінійними елементами, отримано аналітичні вирази для розрахунку інтегральних характеристик, зокрема, середніх та діючих струмів для

різних видів базових функцій діючих сигналів генераторів, а також проведено аналіз можливостей застосування отриманих аналітичних виразів для струмів у електротехнічних Smart-комплексах з циклічно змінюваними параметрами елементів у разі дії періодичних кондуктивних завад різної форми (прямокутної, синусоїдальної та трикутної).

У п'ятому розділі розглянуто особливості побудови та застосування розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення для розрахунку усталених режимів в електротехнічних Smart-комплексах на основі розвитку методу окремих складових, запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом використання запропонованої методології аналізу усталених режимів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електротехнічних Smart-комплексах, а також запропоновано концепцію побудови та модернізації, у тому числі й для оптимізації режимів роботи, елементів електротехнічних Smart-комплексів для Smart-технологій інтелектуального міста, зокрема, для вибору оптимальних параметрів Microgrid та оцінки загальних показників енергоефективності функціонування інтелектуального міста.

Результати дисертаційного дослідження застосовано для оцінки втрат внаслідок дії періодичних завад у електромережі тягових підстанцій Чернігівського тролейбусного управління в рамках реалізації проекту USAID «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту м. Чернігів», розроблено пакет програм, який дає змогу здійснювати розрахунки та аналіз характеристик електротехнічних комплексів, що містять в собі електричні схеми з періодично змінюваними параметрами, надано для застосування в ТОВ «Електросфера» (м. Київ), пропозиції щодо підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення водоканалів, зокрема, для віддалених населених пунктів, в умовах нестабільного енергопостачання та за використання сонячних і вітрогенерацийних установок, передано до ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ).

Результати дослідження з розрахунку в аналітичному вигляді усталених режимів у таких електротехнічних Smart-комплексах, як системи з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, використовуються у процесі викладання дисциплін «Промислова електроніка», «Силова електроніка в системах електропостачання», «Системи силовій електроніки та засоби керування в електроенергетиці», відповідного програмно-алгоритмічного забезпечення, методичних вказівок «Основи силовій електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink» на кафедрі електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Отримані відповідні акти впровадження, а також свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 1000081 «Методологія аналізу локальних мереж (Microgrid) постійного струму з циклічно змінними параметрами елементів» підтверджують практичну значимість та новизну дисертаційних досліджень.

Ключові слова: електротехнічні комплекси, локальні системи електроживлення, інтелектуальні електроенергетичні системи, операторний метод аналізу, метод окремих складових, Smart Grid, Microgrid, Smart City.

SUMMARY

Melnychuk H.V. Development of methods for analysis of stationary modes of operation of electrotechnical Smart-complexes. – Manuscript.

The thesis is for getting a degree of engineering sciences candidate in 05.09.03 specialty – «Electrotechnical complexes and systems». – **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2021.**

The first section of the dissertation reviews current trends in the development of new technologies of local power supply, including electrical Smart-complexes, increasing the share of electrified critical infrastructure, analyzes the main trends in expanding the functionality of electrical complexes using Smart-technologies in different types of variable loads and direct current within the Smart Grid and Smart City concepts. This section defines general approaches to modernization of power supply infrastructure of settlements and development of electrical Smart-complexes taking into account the introduction of modern technologies in the field of local alternative energy sources, energy storage and storage devices, power electronics systems, which allowed further development of the concept (construction) and modernization or optimization of elements of electrical Smart-complexes designed to power consumers of the intelligent city.

In the second section the basic principles of modeling of electrotechnical Smart-complexes by isolation of equivalent generators, converters of the electric power and loadings are analyzed, features of work of modern electrotechnical complexes with cyclically changing parameters by taking into account changes of parameters of equivalent generators determination of the multiplicity of operation of equivalent generators and equivalent loads and the corresponding relations between the periods of operation and the parameters of the elements of electrical complexes. The advantages of analytical methods, in particular, the method of separated components, regarding the possibility of obtaining the results of the calculation in a closed form and the absence of the need to determine the initial conditions in the transition from one interval of continuous voltage of the equivalent generator to another.

In the third section, analytical expressions of images and originals of voltages and currents in electrotechnical Smart-complexes with cyclically variable parameters are obtained, features of analytical calculations in these complexes with modulated voltage parameters of equivalent generators are analyzed by constructing images and originals of voltages and currents for analysis of corresponding types. complexes, including with cyclically changing load parameters. The methodology of analysis using the method of separate components based on Laplace transforms for calculation of electromagnetic processes in systems with periodically (cyclically) changing parameters of generators and loads is developed, the algorithm of calculation of currents in electrotechnical Smart-complexes with cyclically changing parameters and features of its use is formulated functions of active signals of generators.

The fourth section analyzes the features of the analysis of electrotechnical Smart-complexes with nonlinear elements, obtained analytical expressions for calculating the integral characteristics, in particular, average and operating currents for different types of basic functions of active generator signals and analyzed the possibilities of using analytical expressions for currents in electrotechnical Smart-complexes with cyclically changing parameters of elements under the action of periodic conductive noise of various shapes (rectangular, sinusoidal and triangular).

In the fifth section the peculiarities of construction and application of the developed algorithmic software for calculation of steady-state modes in electrotechnical Smart-complexes on the basis of development of a method of separate components are considered calculation of electromagnetic processes in electrotechnical Smart-complexes, and also the concept of construction and modernization, including for optimization of operating modes, elements of electrotechnical Smart-complexes for Smart-technologies of the intellectual city, in particular, for a choice of optimum parameters of Microgrid and an estimation of the general indicators of energy efficiency functioning of the intellectual city.

The results of the dissertation research were used to assess losses due to periodic disturbances in the power grid of traction substations of the Chernihiv Trolleybus

Department within the USAID project «Development and justification of development plan and ways to improve the efficiency of public electric transport in Chernihiv»; developed a package of programs that allows calculations and analysis of the characteristics of electrical complexes containing electrical circuits with periodically changing parameters, provided for use in LLC «Electrosphere» (Kyiv); proposals to increase the energy efficiency of electrical complexes of decentralized power supply of water utilities, in particular, for remote settlements, in conditions of unstable energy supply and the use of solar and wind turbines, transferred to LLC «Interproject GmbH» (Kyiv).

The results of research on the calculation in the analytical form of steady-state modes in such electrical Smart-complexes as systems with power converters with periodically changing parameters of generators and loads are used in teaching disciplines «Industrial Electronics», «Power Electronics in Power Supply Systems», «Power Electronics Systems and control means in the power industry», the corresponding software and algorithmic support, methodical instructions «Fundamentals of power electronics in the power industry. Fundamentals of work in MATLAB Simulink» at the Department of Power Supply of the Institute of Energy Conservation and Energy Management of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

The received relevant acts of implementation, as well as the certificate of copyright registration for the work No 1000081 "Methodology of analysis of local area networks (Microgrid) DC with cyclically variable parameters of the elements" confirm the practical significance and novelty of dissertation research.

Keywords: electrotechnical complexes, local power supply systems, intelligent power systems, operator method of analysis, method of separated components, Smart Grid, Microgrid, Smart City.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Моделювання систем з перетворювачами електроенергії з циклічно-змінюваними параметрами. К.: ТОВ «Наш формат», 2018. 165 с. (*монографія*).
2. Denysiuk S., Melnychuk H. Decentralization of city energy supply systems in the conditions of technological transformations and formation of intellectual cities (smart city). *Scientific foundations of modern engineering. Monograph*. BOSTON (USA), 2020 P.181-204. (*монографія*)
3. Мельничук Г.В. Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. К., 2019. № 4. С.76-86 (*фахове видання*)
4. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Оптимізація роботи електрогенеруючих установок при дії джерела імпульсних завад. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. К., 2016. №4. С.72 –80. (*фахове видання*)
5. Мельничук Г.В., Щербань К.Ю., Прокопенко І.Д. Аналіз впливу завад на характер протікання енергетичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спеціальний випуск*. К. 2012. С.145–152. (*фахове видання*)
6. Мельничук Г.В. Особливості моделювання систем електропостачання з розосередженою генерацією. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спеціальний випуск. Ч.2*. К. 2011. С.191–197. (*фахове видання*)
7. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Аналіз інтегральних характеристик систем електроживлення з циклічно змінними параметрами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* К. 2011. №28. С.30–35. (*фахове видання*)
8. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Розрахунок електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електричної енергії для технологічних систем з циклічно змінюваними параметрами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* К. 2010. №25. С.140–144. (*фахове видання*)

видання)

9. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Формування системи рівнянь змінних стану для розрахунку процесів у електричних комплексах з циклічно змінними режимами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* К. 2005. № 3(12). С. 132–137. **(фахове видання)**

10. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у комплексах з циклічно змінюваними параметрами. *Електроніка та зв'язок.* 2005. № 26. С. 29–36. **(фахове видання)**

11. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* К. 2003. № 3(6). С. 102–108. **(фахове видання)**

12. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Аналіз процесів у перетворювачах електроенергії з циклічно змінюваними параметрами та врахуванням тривалості технологічного процесу. *Техн. електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електротехніки».* Ч.2. 2006. 107–112. **(фахове видання)**

13. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Розвиток методу окремих складових для розрахунку складних електронних систем. *Техн. електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електроніки».* 2008. Ч.3. С.3–8. **(фахове видання)**

14. Melnychuk H. Features of development of Smart Grid networks in communities, modeling methods and challenges in the implementation of intelligent power supply systems. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences.* VIII (30), Issue: 244, 2020, Dec., Budapest. P. 63–65. **(фахове видання країни ЄС)**

15. Melnichuk G. Smart grid networks in communities: general approaches and calculation methods for simulation. *Sciences of Europe (Praha, Czech Republic).* VOL 1, №58 (2020). P.62–65. **(фахове видання країни ЄС)**

16. Колесник П.С., Мельничук Г.В. Аналіз періодичних кондуктивних завад

в системах електроживлення з пристроями силової електроніки. В зб. *«Матеріали II наук.-техн. конф. ІЕЕ НТУУ «КПІ» «Енергетика. Екологія. Людина»*. К. 2011. С.394–399.

17. Денисюк С.П., Колесник П.С., Мельничук Г.В. Аналіз впливу періодичних імпульсних завад на процеси в системі електричного живлення рухомого складу. В зб. *«Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті»* (снт. Чинадієво, 15–19 лютого, 2011 р.).

18. Мельничук Г.В. Особливості використання методів аналізу роботи систем з перетворювачами електричної енергії для оцінки енергоефективності технологічних систем. В зб. *«Матеріали I наук.-техн. конф. ІЕЕ НТУУ «КПІ» «Енергетика. Екологія. Людина»*. К. 2009. С.142–146.

19. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Богдан А.В. Адаптация аналитических методов анализа для повышения эффективности автоматизации проектирования электротехнических комплексов. В сб. *«Материалы IV международной конференции «Электромеханические преобразователи энергии»* (г. Томск, 13–16 октября 2009 г.). С.287-291.

20. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Кондуктивні завади в системах електрифікованого транспорту. *Міжнародна науково-практична конференція. Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017»*. Дніпро, 20 – 21 грудня 2018. С. 15–20.

21. Денисюк С.П., Рибій М.В., Мельничук Г.В. А.С. № 100081Україна. Методологія аналізу локальних мереж (Microgrid) постійного струму з циклічно змінними параметрами елементів». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 100081, дата реєстрації 30.09.2020.

22. Денисюк С.П., Дерев'янка Д.Г., Мельничук Г.В. Системи силової електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink. Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 72 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1	
ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ БАЗОВОГО РІВНЯ SMART GRID.....	26
1.1. Особливості розвитку електротехнічних Smart-комплексів як локальних систем Microgrid.....	26
1.2. Елементи Smart-технологій для Smart City.....	40
1.3. Основні типи навантажень сучасних електротехнічних комплексів (Microgrid).....	48
Висновки до розділу 1.....	58
РОЗДІЛ 2	
МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART-КОМПЛЕКСІВ.....	59
2.1. Принципи аналізу (моделювання) ЕТК-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами.....	59
2.2. Формування часових співвідношень у моделях ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами.....	67
2.3. Особливості побудови моделі ЕТК-Smart за різних співвідношень між періодами роботи елементів моделі.....	72
2.4. Методи розрахунку ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії з еквівалентними генераторами та навантаженнями.....	77
Висновки до розділу 2.....	84
РОЗДІЛ 3	
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕТК-SMART	85
3.1. Побудова зображень і оригіналів струмів для складних функцій напруги генераторів ЕТК-Smart на базі функції рівня	85

3.2. Побудова зображень функцій: синусоїда, експонента, пилоподібна імпульсна функція	96
3.3. Побудова зображень і оригіналів струмів для складних функцій генератора на базі синусоїдальної функції	101
3.4. Особливості побудови зображень функцій напруг і струмів для модульованих функцій	114
Висновки до розділу 3.....	120

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЗАВАД У СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

4.1. Розвиток можливостей методу окремих складових для моделювання усталених режимів у ЕТК-Smart.....	121
4.2. Розрахунок інтегральних характеристик електромагнітних процесів у ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії.....	123
4.3. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завад на електромагнітні процеси в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії	129
4.4. Оптимізація режимів роботи перетворювачів електроенергії в ЕТК-Smart.....	138
Висновки до розділу 4.....	143

РОЗДІЛ 5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ НАВАНТАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ SMART-ТЕХНОЛОГІЙ.....

5.1. Пакет програм аналізу електромагнітних процесів у ЕТК-Smart з циклічно-змінюваними параметрами.....	144
5.2. Основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ЕТК-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення.....	147
5.3. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завад на електромагнітні процеси в системах з перетворювачами електроенергії.....	150

Висновки до розділу 5.....	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	165
Додаток А – Перелік проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid.....	181
Додаток Б – Функції Microgrid, які враховуються при дослідженнях, розробках, створенні прототипів і стандартизації.....	183
Додаток В – Характеристика систем електроживлення на постійному струмі.....	185
Додаток Г – Приклади розрахунку зображень та оригіналів при дії складних функціях напруги.....	190
Додаток Д – Узагальнений алгоритм розрахунку струмів у ЕТК-Smart.....	198
Додаток Е – Документи, що підтверджують практичну значимість результатів дисертаційної роботи.....	216

ПЕРЕЛІК УМНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АІМ – амплітудно-імпульсна модуляція
БФ – базова функція
ВДЕ – відновлювані джерела енергії
ДРГ – джерела розосередженої генерації
ЕКТ – електротехнічні комплекси
ЕТК-Smart – електротехнічні Smart-комплекси
ЕМС – електромагнітна сумісність
ЕРС – електрорушійна сила
ІСС – інтервал сталості структури
МОС – метод окремих складових
НВДЕ – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
ПЕЕ – перетворювачі електричної енергії
ПЕР – паливно-енергетичні ресурси
СК – система керування
СТЕ – ситема тягового електропостачання
ФІМ – фазово-імпульсна модуляція
ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція
DSM – Demand Side Management
HRES – Hybrid Renewable Energy Systems

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Причинами прискорення науково-технічного прогресу в електротехніці є [7, 49, 50, 98, 99, 101]: загальне прискорення науково-технічного прогресу в світовій цивілізації; тотальна електрифікація і тотальна автоматизація, пов'язана з тенденціями четвертої індустріальної революції; прорив у розвитку електротехніки, обумовлений, у першу чергу, досягненнями силової електротехніки та мікроелектроніки; розвиток систем інтелектуального керування та моніторингу; відкритість світового ринку електротехніки, найгостріша конкуренція.

Відповіддю на виклики, що формуються внаслідок одночасного впливу зазначених чинників, є концепція Smart Grid, яка забезпечує реалізацію інтегрованого підходу до оновлення електроенергетики на основі як технологічних інновацій, так і нових економічних, інформаційних взаємодій і відповідних нормативних вимог внаслідок їх впровадження [12, 18, 24, 49, 96, 126, 150, 151]. Термін Smart Grid (інтелектуальна мережа) введений у 2003 році в публікації Michael T. Burr «Reliability demands drive automation investments» [114], проте єдине трактування цього поняття в світовій практиці досі відсутнє.

Основою технологічної складової Smart Grid та безпосередніх інновацій у енергосистемі є виокремлення енергетичних кластерів – локальних енергосистем Microgrid у вигляді електротехнічних комплексів, що включають не лише множину споживачів електроенергії, а й власні джерела генерації та можливості збереження електроенергії, активне керування споживанням на основі визначених алгоритмів і задач [7, 72, 97, 99, 101, 130, 131, 136, 139, 141, 142]. Такі системи можуть бути як окремими кластерами єдиної електромережі, так і мати функцію автономної роботи без під'єднання до централізованого електропостачання, в першу чергу для забезпечення безперебійної роботи критичної інфраструктури.

Ключовим трендом розвитку електротехнічних комплексів (ЕТК) на початку XXI ст. є модернізація існуючих та впровадження нових технологій їхньої

побудови згідно з вимогами концепції Smart Grid [150, 151, 162, 164]. Реалізація положень концепції Smart Grid обумовлена факторами технологічного розвитку, вимогами споживачів до якості та надійності енергозабезпечення та зростаючими вимогами у сфері екологічної безпеки та енергоефективності. Сучасні електротехнічні комплекси розглядаються як окремі Microgrid або складові Microgrid вищого ієрархічного рівня [7, 73, 99, 101, 130, 135].

Розвиток Microgrid як складової Smart Grid визначається концепцією малої розосередженої електроенергетики, яка передбачає створення окремих енергомережових структур, що мають власні джерела енергії і здатні взяти на себе завдання задоволення попиту споживачів за максимуму пікових навантажень, коли центральна мережа не може його забезпечити [19, 53, 64, 81, 92, 122, 126, 137, 140,]. Окремою рисою такого є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та забезпечення електроживлення на постійному струмі [47, 83, 123, 152, 162].

На сьогодні має місце широке урізноманітнення параметрів елементів таких сучасних електротехнічних комплексів, а також режимів їх роботи, зростає рівень їх «інтелектуалізації» [7, 72, 97, 99, 101, 131, 136, 139, 142]. Згідно з концепцією Smart Grid сучасні багатофункціональні електротехнічні комплекси вже наводяться як електротехнічні Smart-комплекси (ЕТК-Smart), які є елементами Smart-технологій та яким притаманні нові властивості [7, 40, 41, 72, 97, 99, 101, 131, 136].

Проведений аналіз дав змогу запропонувати таке визначення:

Електротехнічний Smart-комплекс – це взаємопов’язаний комплекс сучасного електротехнічного та електротехнологічного обладнання, що працює на змінному чи постійному струмі відповідно до вимог концепції Smart Grid, характеризується наявністю різноманітних циклічно змінних параметрів елементів (режимів роботи) та відповідно до своїх режимів функціонування може живитися як від централізованих, так і від децентралізованих джерел електроенергії.

Запровадження Smart-технологій на базі ЕТК-Smart у електроенергетиці України відповідає найкращим європейським практикам і спрямоване на формування ефективного енергетичного сектору якісно нового рівня.

Впровадження Smart-технологій сприяє кращій інтеграції об'єктів відновлюваної енергетики в електроенергетичну систему та балансування їхнього змінного графіка виробництва електроенергії. Також необхідно відзначити широке застосування електротехнічних Smart-комплексів у разі побудови інженерної інфраструктури інтелектуального міста (Smart City) [65, 102, 119–121, 129, 141]. Формування локальної електроенергетичної системи за концепцією Smart Grid як енергетичної складової Smart City потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії їхніх елементів [21, 141, 144–147].

Модернізація електротехнічних комплексів відповідно до вимог концепції Smart Grid у разі зростання частки ВДЕ та урізноманітнення топологій електроенергетичних систем у цілому призводить до суттєвої зміни основних режимів роботи цих електротехнічних об'єктів. Побудова сучасних електротехнічних Smart-комплексів потребує вирішення проблем ефективного функціонування систем електроживлення, реалізації законів оптимального керування у випадку врахування спотворень напруги та струму, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) [5, 14, 22, 36, 38, 74].

Дослідження зазначених питань відображені в працях вітчизняних та іноземних науковців: Денисюка С.П., Жуйкова В.Я., Каплуна В.В., Кириленка О.В., Кулика В.В., Лежнюка П.Д., Мазуренка Л.І., Новського В.О., Островерхова М.Я., Папаїки Ю.А., Пересади С.М., Саєнка Ю.Л., Сиченка В.Г., Чорного О.П., Шаповала І.В., Шидловського А.К., Юрченка О.М., Ямненко Ю.С., Яндульського О.С., Akagi H., Kashem M.A., Lorenz R., Moren J., Saaki I., Strzelecki R., Sun J., Tilli A. та інших вчених.

На сьогодні важливо забезпечити комплексний підхід до розробки, проектування, побудови та ефективного функціонування різних типів ЕТК-Smart [7, 40, 41, 72, 97, 99, 101]. Тому нагальним постає розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів електроживлення, зокрема, в аналітичній формі. Такий аналіз має стати основою

не тільки розробки, але й оцінки ефективного функціонування ЕТК-Smart. Важливими елементами такого дослідження є побудова узагальнених моделей роботи електротехнічних Smart-комплексів як систем з циклічно змінюваними параметрами; аналіз в аналітичній формі усталених режимів за дії генераторів з складною (несинусоїдальною) формою напруги та навантажень з циклічно змінюваними параметрами, оцінка впливу періодичних кондуктивних завад на їхні усталені режими.

У дисертаційній роботі поставлена актуальна наукова задача, яка полягає у розвитку методів аналізу стаціонарних режимів в аналітичній формі навантажень електротехнічних Smart-комплексів для децентралізованого електроживлення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані у роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Дисертаційне дослідження виконувалось згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання КПП ім. Ігоря Сікорського у рамках найважливіших напрямків фундаментальних та прикладних наукових досліджень: «Методи керування виробництвом, передачею, розподілом, перетворенням та споживанням електричної енергії. Керування ефективністю енерговикористання». Результати відображені в науково-дослідницьких роботах «Науково-методичні основи оптимізації структурно-параметричних рішень гнучких систем електропостачання в умовах реструктуризації ринку електроенергії» (№ державної реєстрації 0115U002514) та «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (№ державної реєстрації 0117U004285).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів аналізу стаціонарних режимів в аналітичній формі навантажень електротехнічних Smart-комплексів децентралізованого електроживлення як елементів Smart-технологій.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи були поставлені та

сформульовані такі задачі досліджень:

- проаналізувати особливості розвитку ЕТК-Smart як локальних систем Microgrid;
- побудувати узагальнені моделі роботи ЕТК-Smart як системи з циклічно змінюваними параметрами;
- побудувати зображення складних періодичних функцій напруги еквівалентних генераторів для модульованих сигналів у разі різних видів модуляції;
- побудувати зображення і оригінали струмів усталених режимів на навантаженні у разі дії складних функцій напруги еквівалентних генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень;
- оцінити вплив періодичних кондуктивних завад на усталені режими ЕТК-Smart;
- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу нормальних усталених режимів ЕТК-Smart, а також спотворених режимів за наявності періодичних кондуктивних завад;
- імплементувати розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення в комплексний алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) різних типів ЕТК-Smart та концепцію побудови і модернізації (оптимізації) Smart-технологій на базі ЕТК-Smart для інтелектуального міста.

Об'єкт дослідження: електромагнітні процеси та режими роботи електротехнічних Smart-комплексів децентралізованого електроживлення.

Предмет дослідження: усталені режими роботи електротехнічних Smart-комплексів децентралізованого електроживлення, вплив імпульсних кондуктивних періодичних завад.

Методи дослідження: науково-методичну основу виконаних досліджень склали такі методи: системного аналізу, математичного моделювання, перетворення Лапласа, аналітичні методи аналізу, метод окремих складових для аналізу усталених режимів у колах з ключовими елементами. Дослідження

виконано за допомогою програмного забезпечення MatCAD та MathLAB.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше отримано функціональні залежності для складних та модульованих функцій напруги (струму), які описують процеси в силовій частині ЕТК-Smart, шляхом застосування періодизації окремих складових функцій базовими функціями рівня, прямої пропорційності, синусоїдальними та експоненціальними, теореми запізнювання перетворення Лапласа, зведення нескінченного ряду до замкненого вигляду. Це що дає змогу, на відміну від існуючих підходів, описати усталені електромагнітні процеси в операторній області Лапласа для періодичних складних функцій напруги (струму) у замкненій формі.

2. Розроблено методологію оцінки парціального впливу періодичних кондуктивних завад на усталені режими ЕТК-Smart з використанням методу накладання під час аналізу усталених електромагнітних процесів у ЕТК-Smart, яка, на відміну від існуючих підходів, дає змогу підвищити ефективність роботи ЕТК-Smart та отримати аналітичні вирази для опису протікання електромагнітних процесів у разі дії двох еквівалентних генераторів з кратними та некрратними періодами їхньої вихідної напруги.

3. Розроблено методичне забезпечення оцінки енергоефективності локальних електротехнічних комплексів (Microgrid) як елементів інтелектуальних систем електроживлення, з урахуванням розробленої методології аналізу в аналітичному вигляді стаціонарних режимів роботи ЕТК-Smart, що дало змогу розробити концепцію оцінки режимів роботи та модернізації ЕТК-Smart для Smart City, здійснити експрес-аналіз у випадку проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) таких електротехнічних комплексів за єдиного методологічного підходу до розгляду локальних систем електроживлення, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі.

4. Удосконалено метод окремих складових аналізу усталених режимів для систем змінної структури у разі розрахунку в аналітичній формі усталених режимів для струму (напруги) в ЕТК-Smart за рахунок побудови зображень Лапласа для

складних періодичних функцій напруги за умов нестационарності навантажень та застосування комбінацій базових функцій з використанням їх чергування та пауз, що дає змогу аналізувати режими роботи групи навантажень щодо їхнього узгодженого / неузгодженого включення, оцінити можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень), а також оцінити рівні узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

- розроблене спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення дає змогу аналізувати роботу групи навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінити можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень), а також оцінити парціальний вплив періодичних кондуктивних завад на усталені режими електротехнічних Smart-комплексів у процесі дії двох еквівалентних генераторів з кратними та некратними періодами дії цих генераторів;

- створене методологічне та програмне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів використано у випадку розробки та практичного застосування методичного забезпечення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних Smart-комплексів та у концепції формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart City. Побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому випадку буде забезпечуватися єдиний методологічний підхід до розгляду локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі;

- розроблене методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи в електротехнічних Smart-комплексів

використовується у разі проведення електротехнологічного обстеження для підприємств, зокрема, в Чернігівському тролейбусному управлінні (м. Чернігів), ТОВ «Електросфера» (м. Київ), ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ);

– результати теоретичних та практичних досліджень впроваджено у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського як лекційні матеріали для викладання дисциплін «Промислова електроніка», «Силова електроніка в системах електропостачання», «Системи силових електроніки та засоби керування в електроенергетиці», програмно-алгоритмічного забезпечення та методичних вказівок «Основи силових електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі та [3, 6, 14, 15, 18], отримано автором особисто і полягають у вирішенні проблем розвитку методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: розширення сфери використання методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень [1, 9–13, 21], розроблення аналітичних виразів для моделювання та аналізу періодичних процесів у електротехнічних комплексах з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, а також аналізу завад та інтегральних характеристик [1, 7], визначення співвідношень кратності роботи еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень для забезпечення побудови аналітичних залежностей напруг та струмів методом окремих складових [1, 8, 9, 10, 21], визначення загальних підходів до моделювання кондуктивних завад за допомогою методу окремих складових та перетворень Лапласа у електротехнічних комплексах в умовах локальних мереж електропостачання [4, 5, 17, 19, 20], розроблення алгоритму автоматизації розрахунків напруг та струмів у аналітичній формі методом окремих складових для різних випадків стаціонарних

процесів у електричних комплексах зі змінюваними параметрами [1, 8, 13, 16, 21], розроблення пакета програм на основі алгоритму автоматизації розрахунків напруг та струмів у аналітичній формі методом окремих складових для різних випадків стаціонарних процесів у електричних комплексах зі змінюваними параметрами та використання для оцінки впливів кондуктивних завад [16], застосування можливостей електротехнічних Smart-комплексів для розвитку систем та алгоритмів керування локальними системами електропостачання і формування локальних енергоринків [2].

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2009, 2011 рр.), IV Международной конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009 г.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті» (сmt. Чинадієво, 2011 р.), IX та X Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2006, 2008 рр.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11), Міжнародній науково-технічній конференції «Електричні мережі: сучасні проблеми моніторингу та керування – 2012», 2–5 жовтня 2012 р., с. Жденієве, Закарпатська обл., Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017». Дніпро, 20 – 21 грудня 2018.

Публікації. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень викладено в 22 наукових працях, з яких 2 монографії, 13 статей – у наукових фахових виданнях України, з них 2 статті у виданнях країн ЄС; 1 – свідоцтво про авторське право на науковий твір, 4 – тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 – методичні вказівки.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 164 найменувань і 5 додатків.

Загальний обсяг роботи становить 222 сторінки, у тому числі 165 сторінок основного тексту, 18 таблиць, 47 ілюстрацій за текстом.

РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ БАЗОВОГО РІВНЯ SMART GRID

1.1. Особливості розвитку електротехнічних Smart-комплексів як локальних систем Microgrid

Реалізація концепції Smart Grid передбачає використання в електроенергетиці інноваційних технологій, розширення її сфери застосування на нові галузі, наприклад електротранспорт, створення резервних каналів доставки електроенергії до споживача, введення в експлуатацію сучасних і різнопланових джерел виробництва енергії. Важливим компонентом Smart Grid є постійна модернізація засобів підтримання балансу між виробництвом і споживанням електроенергії на базі сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій, а також впровадження засобів контрольованого перетворення електроенергії. Вони дадуть можливість споживати енергію в кількості, потрібній для певних кінцевих споживачів.

Міністерство енергетики США приписує Smart Grid здатність до самовідновлення після збоїв, стійкість до фізичних і комп'ютерних атак, забезпечення необхідних якісних характеристик у подачі електроенергії, взаємозв'язок і синхронність роботи різних вузлів системи, використання сучасних високих технологій [159]. Європейська комісія з електроенергетики вказує, що даний тип систем має відповідати таким критеріям: гнучко і ефективно підлаштовуватися під потреби споживачів у разі зміни кількісних і якісних показників споживання; мати високу захищеність мереж від різних загроз і надійність постачання енергетичних ресурсів споживачеві; мати можливість розширення мереж за рахунок підключення нових генеруючих джерел енергії та споживачів; використовувати інноваційні технології [158].

Концепція Smart Grid передбачає радикальну зміну топології електричних мереж. Так, вже реалізуються проекти переходу від електричних мереж з однофазним джерелом синусоїдальної напруги до електричних мереж з джерелом

постійної напруги. Перспектива практично реалізувати СЕП на базі концепції Smart Grid з'явилася внаслідок досягнень альтернативної енергетики, прогресу в створенні енергоємних накопичувачів енергії, досягнень силової електроніки (ПЕЕ), а також розвитку теорії й технології аналізу виділених типів ЕТК-Smart.

Згідно з Енергетичною стратегією до 2035 року заплановано зменшення технологічних втрат електроенергії до 7,5%. Якби такого показника було досягнуто в 2019 році, втрати електроенергії були б менші на 6 млрд. кВт·год, що еквівалентно 3 млн. т спаленого вугілля на ТЕС. Значна частина цих втрат є нетехнічними (комерційними). Цьому сприяють величезна кількість застарілих лічильників електроенергії; незадовільний рівень надійності електропостачання. За даними Міненерго, середня тривалість відключення клієнта за 2019 рік по Україні склала 478 хв. для планових відключень і 683 хв. для непланових. У ЄС цей показник склав 160 і 102 хв. відповідно.

Змінити ситуацію на краще має впровадження в нашій країні концепції Smart Grid, зокрема, впровадження інтелектуального обліку, автоматизація розподільних мереж, реалізація масштабної диджиталізації, перехід до концепції неперервного електропостачання, зокрема, з використання різних типів Microgrid як у вигляді ЕТК-Smart, так і різних типів ЕТК-Smart у Microgrid складі вищого рівня.

Зростання поширення використання електроенергії для різноманітних потреб, підвищення значення електроенергії для забезпечення стійкості інфраструктурних комплексів та систем, розвиток локальних засобів генерації електроенергії, поява та поширення локальних засобів збереження електроенергії, впровадження інтелектуальних інтегрованих систем керування та низка інших технологічних інновацій зумовлюють поступовий перехід від вертикально-інтегрованої до кластерної та мережевої структури регіональної локальної енергосистеми та відповідні вимоги до формування ЕКТ і аналізу та оптимізації процесів у них [133].

Загалом можна виділити такі ключові чинники, що спричиняють значний вплив на зміни структури електроенергетичної системи і водночас сприяють

кластеризації електромереж та розвитку електротехнічних комплексів [7, 101, 113, 121–123, 162, 164]:

- 1) значне здешевлення засобів локальної електрогенерації, насамперед альтернативних джерел енергії (сонячні батареї, вітрові установки);
- 2) поява активного споживача (просьюмера), коли власник засобів локальної електрогенерації є одночасно і споживачем електроенергії, у тому числі з централізованої мережі, і є як її постачальник;
- 3) поява технологій накопичення та зберігання електроенергії у локальних масштабах (традиційно такі функції відігравали лише гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС) промислових масштабів) відбувається поширення стаціонарних акумуляторів на рівні домогосподарств та технології взаємодії електромобілів з мережею за технологією Vehicle to Grid (V2G);
- 4) поширення технологій керування споживанням на боці споживача, формування програм споживання, визначення пріоритетних та критичних споживачів електроенергії;
- 5) поява технологій інтелектуального керування мережею, які забезпечують безпеку, надійність та ефективність функціонування електротехнічних комплексів, а також реалізацію програм поведінки просьюмера на енергоринку.

Коротко охарактеризуємо основні науково-технічні проблеми, пов'язані з функціонуванням окремих типів ЕТК-Smart.

Характерною особливістю сучасних ЕТК-Smart є збільшення кількості споживачів з нелінійними ВАХ, які обумовлюють у випадку своєї роботи появу в системі струмів і напруги несинусоїдної форми. Високий рівень вмісту гармонік негативно впливає на ефективність роботи промислового електрообладнання, обчислювальної техніки, побутових приладів, призводить до зростання втрат електроенергії, спричиняє прискорене старіння ізоляції.

Сукупність електрообладнання, які реалізують сучасні електротехнології, слід розглядати як єдиний ЕТК-Smart, до якого входять: система електроживлення

та розподілу енергії; система головних електроприводів; система допоміжних електроприводів; система автоматизації, захисту, діагностики тощо; допоміжні електроприводи і системи життєзабезпечення. На сьогодні ЕКТ у багатьох випадках розглядається як взаємозалежна сукупність електроприводів і електрообладнання, що визначає необхідність комплексного підходу до цього проектування.

ЕТК-Smart практично завжди мають досить різноманітний склад електрообладнання. Робота такого обладнання пов'язана з електричними режимами, які мають суттєвий вплив на терміни нормальної його експлуатації. Основним чинником, що впливає на стан електрообладнання, є його навантаження, яке далеко не завжди відповідає номінальній потужності.

На сьогодні відсутність комплексного підходу до розгляду дихотомії «електрообладнання + система електроживлення» як єдиного цілого є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень у нормальній роботі обладнання, що призводить до отримання недостатніх даних про його технічний стан [58].

Проблема забезпечення якості електроенергії в електричних мережах набула протягом останнього десятиліття особливої актуальності [5, 8, 19, 25, 34, 44, 48, 79, 80, 96], що викликано широким впровадженням нових прогресивних технологічних процесів і систем і, як наслідок, безперервним зростанням числа і потужності нелінійних, несиметричних і швидкозмінних споживачів електроенергії, засобів цифрової техніки, а також відповідними режимними змінами поточкорозподілу в електричних мережах.

Масове впровадження регульованих електроприводів на основі перетворювачів викликає погіршення якості електроенергії мережі живлення для інших споживачів, що спричинено несинусоїдальністю споживаного такими електроприводами струму [106]. Зниження коефіцієнта потужності в таких електроприводах збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. У електричних мережах підприємств із сучасним устаткуванням ПЕЕ

застосовуються все ширше. Питома вага нелінійних навантажень безупинно зростає, що обумовлює зростання рівня вищих гармонік у напругах мережі до 20 %. Низька якість електроенергії збільшує енергетичні та економічні втрати, призводить до експлуатаційних проблем виробництва і навіть перенавантаження трансформаторів.

Так, наприклад, металургійні підприємства мають у своєму складі найбільш потужні електроприймачі [107]. Для них характерні різкозмінні навантаження, що призводять до відчутних негативних наслідків як в економічному плані (збільшення питомих витрат на одиницю продукції), так і у виробничій сфері (погіршення якості електроенергії з подальшим зниженням рівня надійності обладнання). Багато досліджень показують, що в металургійних виробництвах ефективно використовувати сучасні компенсуючі системи типу СТАТКОМ. Необхідно відзначити актуальність виконання комплексних досліджень ЕМС та надійності електропостачання ЕТК-Smart для гірничих підприємств, зважаючи на вимоги переходу до інтелектуальної енергетики – енергетики нового покоління [79].

Для підприємств та організацій різноманітного профілю (наприклад, харчової промисловості, машинобудування тощо) різні типи ЕТК-Smart мають складну структуру і складаються з великої кількості взаємопов'язаних апаратів, об'єднаних матеріальними та енергетичними потоками [96]. До електротехнічної частини таких комплексів входить силове обладнання (двигуни, електромагнітні пускачі, частотні перетворювачі) та обладнання для автоматизованого контролю та керування протіканням електротехнічних процесів (датчики, виконавчі механізми, регулюючі органи). Електротехнічні комплекси мають складну структуру і складаються з великої кількості взаємопов'язаних елементів, об'єднаних матеріальними, інформаційними, тепловими та енергетичними потоками.

Впровадження заходів з підвищення енергоефективності у системах тягового електропостачання (СТЕ), як окремого виду ЕТК-Smart, які мають значну кількість нелінійних і нестационарних споживачів, передбачає забезпечення заданих рівнів

якості електроенергії в системах і ЕМС її елементів [93, 94]. Це пов'язано з тим, що зниження якості напруги і струму в СТЕ призводить до порушення технологічних режимів, зростання рівнів споживання активної і реактивної потужностей, додаткових втрат активної енергії, скорочення терміну служби і зниженню коефіцієнта потужності системи і відповідно продуктивності електричного устаткування. Основним фактором цих негативних явищ є, як відомо, розповсюдження кондуктивних перешкод через різноманітні гальванічні зв'язки.

Для України є забезпечення надійного і ефективного електроживлення споживачів, відокремлених від центральної електричної мережі. Одним з найбільш перспективних способів вирішення цієї проблеми є застосування гібридних систем електропостачання на основі ВДЕ (Hybrid Renewable Energy Systems – HRES) [156]. Для побудови HRES з необхідним рівнем надійності та високими техніко-економічними показниками необхідно забезпечити ефективне використання та перетворення первинної відновлюваної енергії.

Відсутність на ринку відновлюваної енергетики універсальних технічних пристроїв, що забезпечують можливість об'єднання в рамках єдиної енергетичної системи різнотипних енергетичних установок з можливістю ефективного керування режимами їх роботи, є негативним фактором розвитку малої енергетики України.

Створення комбінованих автономних систем електропостачання з ВДЕ вимагає вирішення наукової проблеми керування процесами перетворення і розподілу енергії в ізолюваних електроенергетичних системах з генеруючими установками різних типів НВДЕ, що забезпечує їхню високу енергетичну ефективність, що має важливе соціально-економічне значення для децентралізованого енергозабезпечення [75].

У випадку застосування ЕТК-Smart на базі СЕС та ВЕС необхідно вирішити завдання вибору оптимального складу основного і допоміжного обладнання, керування системою, її монтажу і експлуатації.

ВДЕ, об'єднані в Microgrid одного технологічного рівня, можуть стати

економічно ефективним способом забезпечити доступ до надійного і недорогого електроживлення, причому такі системи електропостачання (СЕП) можуть працювати як автономно, так і спільно з основними електричними мережами.

Сьогодні підвищення уваги до перетворення електричної енергії на рівні локальних СЕП та ЕКТ-Smart пов'язано і з поширенням електромобілів та відповідно інфраструктури їх заряджання [78, 125, 155]. Так, окремою проблемою, пов'язаною з впливом електромобілів на СЕП, є збільшення кількості силових електронних перетворювачів та зарядних пристроїв. Типова структура такої схеми використовує проміжне перетворення AC / DC / DC / AC, високочастотний трансформатор та повторне випрямлення змінного/постійного струму (рис. 1.1).

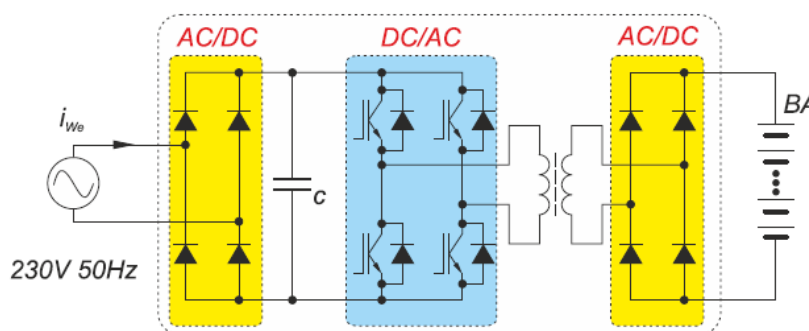


Рисунок 1.1 – Типова структура заряджання акумуляторної батареї

Разом це дає змогу сформувати концепцію адаптивної швидкої та надшвидкої системи заряджання (рис. 1.2), що складається з джерел електроенергії (підключення до централізованої мережі, підключення до альтернативних джерел енергії через інтерфейс силової електроніки PEI, гібридного накопичувача електроенергії HBS), перетворювачів електроенергії (активний випрямляч PFC та подвійний активний міст з ВЧ-ізоляцією трансформатора DAB, а також безпосередньо зарядного комплексу (надшвидкий термінал для заряджання UFCh, термінал для швидкого заряджання FCh та термінал звичайного заряджання NCh) [125].

Можливі сценарії, коли у разі використання інтелектуальних систем заряджання електромобілів час роботи заряджальної системи буде обрано

автоматично (з врахуванням диверсифікації тарифів на електроенергію за часом доби) для забезпечення мінімізації енергетичних витрат, тобто витрат на заправку транспортних засобів, що потребує відповідного моделювання електромагнітних процесів.

На рис.1.2 наведено практичну реалізацію концепції адаптивного швидкого та надшвидкого заряджання електромобілів, запропонованої компанією АРЕКС (Польща, м. Гдиня) [155].

Розвиток локальних енергосистем Microgrid все більше отримує підтримку на державному рівні. Так, у 2014 році у США на замовлення Міністерства енергетики було розроблено документ «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability», яким визначено найвищий пріоритет розвитку досліджень у сфері Microgrid. Міністерство встановило, що комерційні проекти у цій галузі мають забезпечувати зниження шкідливих викидів не менше ніж на 20% та збільшувати енергоефективність не менше ніж на 20% [148]. Водночас цим документом було визначено дорожню карту подальших досліджень та установи і організації, що мають бути залучені до процесу впровадження вдосконалених Microgrid. Зокрема, дорожньою картою передбачається вже у 2020-х роках перейти до застосування динамічних Microgrid, а процес розвитку досліджень у галузі вдосконалених Microgrid має поєднувати питання впровадження розумних мереж Smart Grid, стандартів та протоколів, зниження витрат, безпеки та інших завдань.

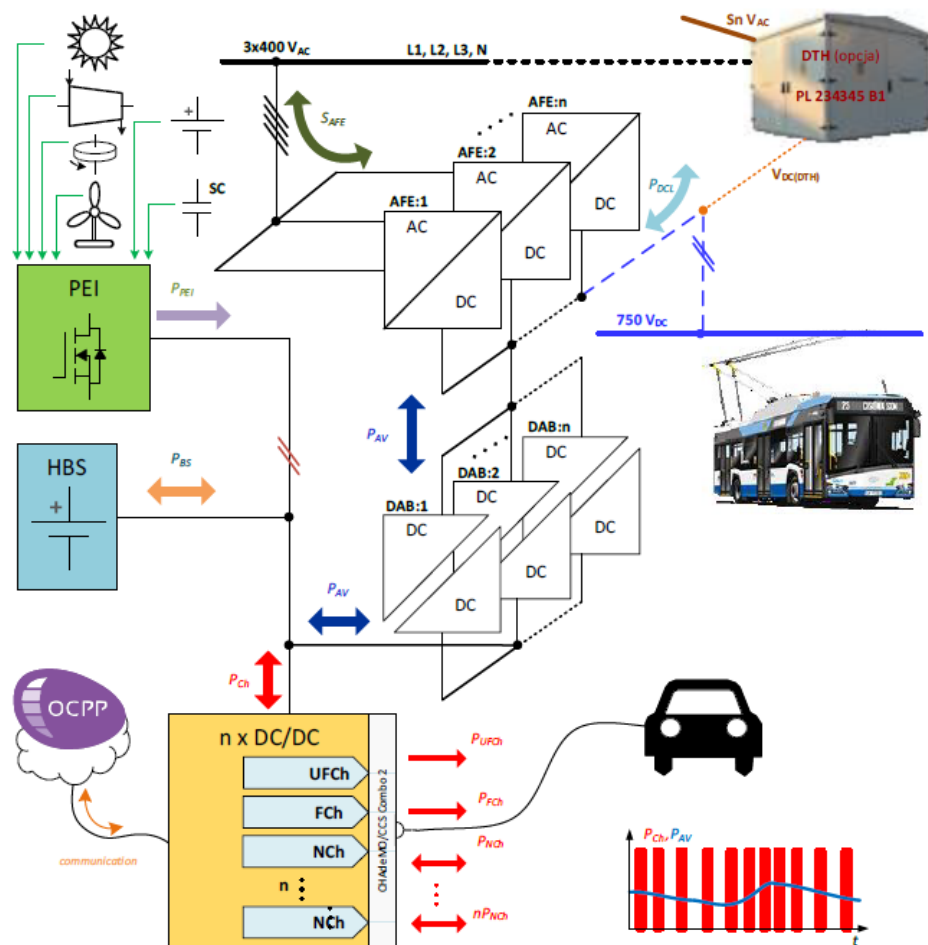


Рисунок 1.2 – Практична реалізація концепції адаптивного швидкого та надшвидкого заряджання електромобілів

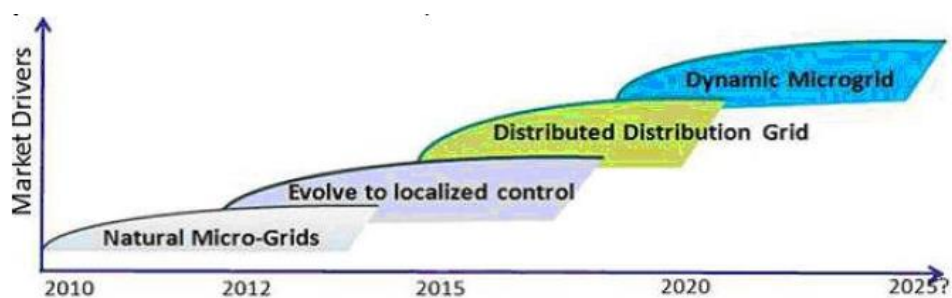


Рисунок 1.3 – Розвиток досліджень згідно з документом «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability»

IEEE підготував два стандарти щодо вимог до контролерів керування Microgrid-системами: IEEE P2030.7 Standart for Specification of Microgrid Controllers та IEEE P2030.8 Standart for Testing of Microgrid Controllers. Зазначені стандарти спрямовані на реалізацію одного з ключових завдань дорожньої карти

запровадження Advanced Microgrid – забезпечення взаємодій Microgrid між собою та з централізованою мережею у режимі реального часу [148, 155]. Найбільш відомі проекти Microgrid наведено в Додатку А.

Серед ключових задач запровадження наведеного підходу до модернізації електроенергетичної системи вважаються такі [72, 102]:

- 1) забезпечення надійності енергопостачання за рахунок оперативного перемикання споживачів між загальною енергосистемою і місцевими джерелами енергії у випадку перевантажень та стрибків напруги;
- 2) забезпечення визначених параметрів якості електроенергії шляхом підтримки постійної напруги і скорочення різких перепадів;
- 3) скорочення використання електроенергії, отриманої шляхом спалювання викопного палива, завдяки застосуванню ВДЕ;
- 4) оптимізація режиму енергоспоживання централізованої електромережі шляхом згладжування пікових навантажень;
- 5) застосування економічних стимулів оптимізації режиму роботи локальних енергосистем через диференційовані тарифи централізованої електромережі;
- 6) збільшення приватних інвестицій у розвиток енергомережі, зокрема у відновлювані джерела енергії, засоби її накопичення і зберігання, а також у підвищення інформаційної складової енергосистеми.

Наразі поширення набули Microgrid, які можна класифікувати на три типи відповідно до їх функціонального призначення [73]. Перше – це ЕТК-Smart з виробництва електроенергії за допомогою альтернативних джерел енергії (невеликі ГЕС, сонячні та вітряні установки, генератори на біогазі чи інших видах палива).

Другий умовний тип – ЕТК-Smart, які забезпечують підвищені вимоги споживачів до якості електроенергії та надійності електропостачання, зокрема, об'єкти та системи критичної інфраструктури (медичні центри, фінансові установи, системи безпеки та забезпечення життєдіяльності).

Третій тип – віддалені мікромережі з ETK-Smart, які, як і перший тип, застосовують локальні джерела електроенергії, а також мають вимоги до керування резервами потужності у випадку надзвичайних ситуацій.

Зростає кількість джерел енергії, які інтегруються в загальну мережу. Серед них – розосереджені сонячні батареї, газові турбіни, малі вітряні електростанції, системи когенерації [7, 62, 101, 102]. Завдяки цьому затребуваними стають технології Microgrid, системи керування споживанням. Ключовим моментом для перебудови ринку постає перевищення виробництва додаткової енергії за рахунок розподілених джерел над централізованою генерацією.

Системи малої розосередженої енергетики (Microgrid) – це мережева структура, забезпечена власними джерелами енергії, що дає змогу забезпечити попит у разі пікових навантажень у центральній мережі. Реалізація Microgrid можлива на стику технологій: автономні сенсори для моніторингу напруги; цифрові платформи Інтернету речей, що забезпечують інтеграцію пристроїв різного типу, збір і передбачувальну аналітику даних; передова електроніка: твердотільні трансформатори, нітридні напівпровідники, карбідокремнієві транзистори, розумні перемикачі; гібридні батареї, надпровідні накопичувачі, літєві акумулятори нового покоління; ринок Microgrid перебуває на стадії становлення, прогнозні середньорічні темпи зростання в найближчі сім років оцінюються в 17,1%.

Водночас все більш зростаючі вимоги до якості електроенергії, урізноманітнення параметрів електроенергії кінцевих споживачів (зокрема, поширення споживачів постійного струму), збільшення частки споживачів, що споживають реактивну потужність, і, як наслідок, підвищення складності загальної електромережі зумовлюють необхідність поширення застосування підходів формування та управління Microgrid у інших галузях застосування електроенергії, окрім наведених вище [121].

Сегментація Microgrid за основним своїм функціональним призначенням наведена на рис. 1.4 [73].



Рис. 1.4 – Сегментація Microgrid за функціональним призначенням

У подальшому сучасні Microgrid розглядатимуться як електротехнічні комплекси децентралізованого електроживлення (ETK-Smart), що утворюють нижчі рівні ієрархічної структури енергосистеми, але водночас можуть розглядатися відокремлено. На основі Microgrid різних рівнів інтеграції формується інтелектуальна мережа Smart Grid як енергетична складова загальної концепції Smart City.

Функції Microgrid з ETK-Smart, які слід враховувати у всіх дослідженнях, розробках, створенні прототипів і розробках стандартизації [82, 113, 123, 135]: незалежність, стабільність, сумісність, гнучкість, розширюваність, ефективність, економічність, модель з'єднання рівноправних вузлів (див. Додаток Б).

Певний прогноз діяльності підприємства може бути здійснений у рамках так званого сценарного підходу [84]. Наприклад, можна виділити сценарії недозавантаження, перезавантаження, середнього завантаження підприємства тощо. Виникає задача щодо ідентифікації сценаріїв поведінки електричних навантажень окремих електротехнічних комплексів (окремих підприємств), агрегації декількох сценаріїв у єдину модель прогнозування поведінки та оптимізації керування електричних навантажень електротехнічних комплексів.

Впровадження Smart-технологій сприятиме кращій інтеграції об'єктів відновлюваної енергетики в енергосистему та балансування їхнього змінного графіка виробництва енергії.

За даними Звіту Redenex «Macro possibilities of microgeneration»,

відновлювальна енергетика найближчими роками має стати домінуючим напрямком у світові інвестиції в енергетичному комплексі [140]. В першу чергу це стосується СЕС і ВЕС. До 2040 року на ВДЕ буде припадати до 48% від встановленої потужності в світі та до 34% виробництва електроенергії.

Ключовою передумовою запровадження ефективних алгоритмів керування системами Microgrid є моделювання процесів та прогнози можливості для більш гнучкого керування локальними енергосистемами [134]. Для цього найбільше підходять аналітичні методи, які, на відміну від чисельних, дають змогу проводити аналіз нелінійного кола в загальному виді, а не для визначених значень параметрів елементів схеми.

В умовах дефіциту генерованої потужності, зношеності електроенергетичного та електротехнічного обладнання, широкого поширення нелінійних перетворювальних навантажень, різноманітних типів перетворювачів електричної енергії в системах електроживлення загострюється проблема ЕМС [5, 14, 22, 37, 38, 74]. Джерелами електромагнітних завад стають не тільки навантаження (споживачі), але й самі постачальники (генератори) електроенергії.

Проблема забезпечення ЕМС у виділених ЕКТ-Smart безпосередньо пов'язана з оцінкою якості енергії [7, 8, 36, 39, 74]. Вплив “неякісності” електроенергії в СЕП у більшості випадків виявляється на рівні порушень технологічних процесів, роботи інформаційно-обчислювальних систем тощо. Якщо поняття ЕМС в основному характеризує вимоги до елементів системи та їх взаємний вплив, то якість електроенергії сприймається як характеристика вимог, що висуваються до джерела електроенергії. Рівень ЕМС є одним із визначальних показників СЕП, що обумовлює величини їх техніко-економічних показників, вплив на інші системи та на навколишнє природне середовище.

У цьому випадку можна виділити такі джерела кондуктивних перешкод [7, 8, 36, 39, 74]:

- робота перетворювачів електроенергії, які призводять до суттєвого спотворення сигналів;

- відключення індуктивного навантаження, трансформаторів, що може призвести до імпульсних перенапруг;
- комутація контакторів, яка призводить до накладання на напругу електромережі мікросекундних імпульсів, що є небезпекою для цифрової обчислювальної техніки;
- включення споживачів електроенергії, конденсаторних батарей, що обумовлює виникнення в СЕП імпульсів, симетрично та несиметрично прикладених до проводів, а також до зміни діючого значення напруги;
- однофазні замикання на корпус, які є небезпечним джерелом імпульсних перешкод;
- робота колекторних двигунів, люмінесцентних ламп, яка призводить до виникнення імпульсних перешкод широкого частотного діапазону.

Так, імпульсні завади є послідовністю імпульсів довільної форми з випадковими амплітудами, тривалістю та часом появи, причому інтервали часу між імпульсами досить великі [22, 70, 74]. Для імпульсних завад характерно те, що перехідні процеси, викликані окремими імпульсами, не накладаються один на одного, оскільки тривалість завади значно менша від часу устанавлення. Пікова потужність імпульсних завад пропорційна квадрату ширини пропускання, а напруга – полосі пропускання.

Через дію завад змінюється графік навантажувальної та перевальної характеристик, коливаються діючі значення робочого струму та амплітуди [22, 70, 74]. Чим більша потужність використаного перетворювача, тим більші завади він вносить в систему, тому слід більш докладно дослідити питання впливу періодичних імпульсних завад на роботу системи електроживлення.

Кондуктивні завади за характером поширення, тривалістю та регулярністю і формою генерованої завади можна поділити за такими характеристиками [70, 74]:

- 1) за характером поширення: симетричні (диференціальні), несиметричні (загального виду);
- 2) за тривалістю та регулярністю завади – безперервні (стаціонарна),

короткотривалі, регулярні, випадкові;

3) за формою генерованої завади – моносинусоїдальні, полісинусоїдальні, імпульсні.

До причин виникнення в системі кондуктивних електромагнітних завад, тобто взаємного впливу пристроїв або кондуктивних елементів, можна віднести такі: напруга живлення з частотою 50 Гц; високо- та низькочастотні тактові сигнали; сигнали в лініях керування або передачі даних; комутаційні процеси в індуктивності; розряди в моменти замикання або розмикання контактів.

1.2. Елементи Smart-технологій для Smart City

Внаслідок урбанізації населення в містах-мегаполісах спостерігається експоненціальне зростання енергоспоживання, у тому числі й для вирішення транспортної проблеми, що в підсумку визначає зростання цінності паливо-енергетичних ресурсів (ПЕР) [80]. Актуальними стають питання не тільки пошуку нових джерел енергії, а й раціонального, ефективного використання існуючих. Зокрема, в електроенергетиці це розробка комплексу енергозберігаючих, енергоефективних заходів, який, перш за все, передбачає підвищення якості електроенергії.

Збільшення рівнів урбанізації населення країни та зростання великих міст зумовлюють зростання споживання електроенергії, розширення та ускладнення електромереж, а також появу низки викликів [45, 60, 63, 68, 85, 103, 112]:

- 1) нестача генеруючих потужностей;
- 2) нестача розподільних мереж на рівні 110 – 220 кВ, щоб довести ці потужності до районів великих міст;
- 3) ненадійність місцевих електропостачань споживачів розподільних мереж 6 (10) і 0,4 кВ;
- 4) нестійкість роботи систем генерації, передачі, розподілу електроенергії;
- 5) відсутність ефективного балансування генерації та споживання електроенергії, особливо у розрізі доби;

б) неефективне формування тарифів, що не сприяють керуванню споживанням та впровадженню інноваційних технологій.

Забезпечення надійності та стійкості енергосистем міст, що стрімко розвиваються та змінюються, є важливою проблемою, одним із шляхів вирішення якої є широке впровадження ЕКТ-Smart. Сьогодні у світі набуває все більшого поширення концепція «інтелектуального міста» – Smart City, що поєднує нові технологічні рішення з можливостями інформаційних технологій та інтегрованим підходом до розвитку систем [15, 119, 133, 145, 163].

Центром регіональної науки Віденського технологічного університету (Vienna University of Technology) було виділено шість напрямків побудови інтелектуальних міст (Smart City): інтелектуальне середовище (природні ресурси), інтелектуальні люди (соціальний і людський капітал), інтелектуальна мобільність (транспорт та інтелектуальне керування транспортом), інтелектуальний спосіб життя (якість життя), інтелектуальна економіка, або економіка, що базується на знаннях (конкурентоспроможність), інтелектуальне керування (участь) [133, 145, 163].

Концепція інтелектуального міста (Smart City) – це розвиток соціально-орієнтованої інфраструктури, включаючи інтелектуальне енергопостачання (інтелектуальну мережеву систему Smart Grid), інтелектуальне середовище, інтелектуальний транспорт, інтелектуальний будинок, інтелектуальне керування, що є неможливим без використання різних типів ЕТК-Smart. Змінення умов та вимог ефективного енергоспоживання у разі переходу від централізованих до розосереджених систем енергозабезпечення. Нові технології у сферах електроенергетики та інформатизації надають нові можливості для вдосконалення енергосистем населених пунктів, що значно впливає і на якість життя мешканців, і на можливості для ділової активності, і на поліпшення екологічної ситуації.

Згідно з дослідженнями консалтингового агентства Navigant Research, на сьогоднішній день Smart City включає в себе такі ключові складові [62, 65, 102, 119–121, 124, 129, 132, 141, 143–147]:

- **Smart Energy:** передбачає низку рішень, що застосовуються в сферах енергопостачання та енергозбереження (програми керування попитом, енергоефективності та інтеграції ВДЕ);

- **Smart Water:** передбачає керування водними ресурсами (модернізація водних систем, моніторинг споживання води по секторах, системи екологічної безпеки та контролю повеней);

- **Smart Buildings:** передбачає створення або облаштування окремих будівель, які акумулюють в собі всі інженерні та інформаційні системи і інтегруються в єдину систему керування (BMS – Building Management System);

- **Smart Transportation:** передбачає створення системи інтелектуальних транспортних і логістичних систем, які забезпечують моніторинг та керування трафіком, дають змогу контролювати оплату дорожніх зборів, реагувати на надзвичайні ситуації, керувати світлофорами;

- **Smart Government:** передбачає застосування інформаційних технологій для надання державних послуг широкому колу осіб і дає змогу оптимізувати роботи різних департаментів адміністрацій.

Наразі можна виділити такі умовні фази інтелектуалізації міст [65, 102, 121]:

Smart City 1.0 – підвищення ефективності керування містом; міські менеджери отримують доступ до інтегрованих даних про стан сервісів, енергії та інфраструктури в реальному часі; на ринку домінують великі технологічні компанії;

Smart City 2.0 – розвиток і керування містом на базі цифрових моделей інфраструктури; включення стартапів та малих і середніх інноваційних підприємств у ринкові сегменти Smart City;

Smart City 3.0 – Smart City як стратегія розвитку міст зі спільним баченням; залучення всіх груп учасників (приватний сектор, спільноти, академічне середовище, кластери, органи влади, інститути розвитку), формування стійких інноваційних екосистем на базі ІКТ; громадяни отримують ключову роль у формуванні вигляду міст і можливостей взаємодії з міським середовищем.

На сьогоднішній день енергетична складова Smart City (Smart Energy) включає в себе низку рішень, що застосовуються в сферах енергопостачання та енергозбереження (програми керування попитом, енергоефективності та інтеграції ВДЕ) [154, 161]. Характеристика умовних фаз становлення інтелектуальних міст з точки зору енергетики, мереж і комунікацій, розвитку інфраструктури наведена в табл. 1.1 [62, 102, 121].

Проведений аналіз показує, що в рамках виділених умовних фаз енергетики, мереж і комунікацій та інфраструктури, потребує широкого використання різних типів ЕТК-Smart.

Таблиця 1.1 – Характеристика умовних фаз становлення інтелектуальних міст

Ключові складові Smart City	Smart City 1.0	Smart City 2.0	Smart City 3.0
Енергетика	Системи керування електроенергією	Інтелектуальні системи розподілу і керування електроенергією (Smart Grid, Microgrid, AMR)	Сполучені системи розподілу і споживання електроенергії (Connected Smart Grid Systems)
Мережі та комунікації	Gis-інформування; канали провідного наземного зв'язку	Інтелектуальні мережі, бездротові точки доступу до мережі Інтернет, 3G/4G, оптимальні мережі (wireless broadband service)	Семантичні мережі, об'єднання дані; відкриті дані з різних джерел для розпізнавання патернів, генерації оповіщень, візуалізації інформації, передбачувана аналітика (semantic web, predictive analytics)
Інфраструктура	Сталий розвиток інфраструктури та будинків	Системи переробки і розподілу відходів, «зелені» будівлі, енергоефективні будівлі	Інтелектуальні автоматизовані будівлі та інфраструктури

Енергетичною платформою концепції Smart City є інтелектуальне енергопостачання, що здійснюється мережевою системою Smart Grid. Нові технології у сферах електроенергетики та інформатизації надають нові можливості для вдосконалення енергосистем населених пунктів, що значно впливає і на якість

життя мешканців, і на можливості для ділової активності, і на покращення екологічної ситуації [62, 102, 119, 124, 129, 141, 143, 146].

Формування локальної енергосистеми за концепцією Smart Grid як енергетичної складової Smart City потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії суб'єктів господарювання та фінансових розрахунків, що також потребує відповідного інструментарію моделювання електромагнітних процесів.

У довгостроковій перспективі на передній план виходять проблеми функціонування, розвитку і якісної модернізації розподільних мереж з різними типами ЕТК-Smart. Це обумовлено як традиційними проблемами розподільного комплексу, так і останніми тенденціями зміни структури генеруючих потужностей і розподілу навантаження. Мова йдеться про зміну загальних принципів роботи комплексу із значним підвищенням якості електроенергії, надійності, спостережливості та керованості мережі, як наслідок постійно зростаючих вимог споживачів до якості електроенергії та зменшення часу ліквідації аварій.

На рівні загальної архітектури електроенергетики відбуваються структурні зміни [72, 102, 121]. Кінцевим користувачем енергетичної системи стає просьюмер – активний споживач, який не тільки використовує, а й виробляє енергію. Через адаптивні цифрові мережі просьюмер вступає в «партнерство» з навколишнім середовищем, будь то єдина енергетична система країни, енергосистема міста або сусіднє домогосподарство. Монетизується енергообмін за допомогою цифрової платформи, що дає змогу конструювати сервіси і без посередників здійснювати мікроінвестиції. Так навколо просьюмера формується інтернет енергії – екосистема виробників і споживачів енергії, які безперешкодно інтегруються в загальну інфраструктуру і обмінюються енергією.

Протягом найближчих п'яти років повністю сформується пакет нових Smart-технологій. До нього увійдуть різні типи ПЕЕ, які дають змогу керувати потоками потужності в різних мережах; технології зберігання електроенергії, розподіленого інтелектуального керування, породжуючого проектування і моделювання, а також

високі фінансові технології – блокчейни, Smart-контракти, децентралізовані автономні організації [7, 62, 101, 102, 141, 143, 146]. Технологічні зміни торкаються всіх основних сегментів (генерацію, передачу, розподіл енергії і кінцеве споживання) і перебудовують сформовані бізнес-моделі.

Еволюція технологій Smart Grid наведена в табл. 1.2. Особливості трансформації сегментів галузі електроенергетики зведено в табл. 1.3.

Застосування систем Smart Grid для міст означає, перш за все, підвищення надійності мереж і зниження витрат на їх обслуговування. Також до потенційних ефектів впровадження передових технологій можна віднести:

- розвиток систем для майбутнього застосування електротранспорту;
- створення мережі накопичувачів енергії, розташованих на території міста;
- доступ до енергії від багатофункціональних мереж;
- балансування піків споживання і коливання генерації енергії, у тому числі за рахунок інтеграції транспортної та енергетичної мереж, наприклад, електричні транспортні засоби використовуються і як місце зберігання, так і джерело електроенергії.

Таблиця 1.2 – Еволюція технологій Smart Grid

Модернізація 2005 – 2015 рр.		Прорив за рахунок інтеграції 2015 – 2020+ рр.
Устаткування для передачі і вимірювання	Автоматизовані системи керування	Передова вимірювальна інфраструктура (Advanced Metering Infrastructure)
<ul style="list-style-type: none"> – вимірювальні прилади – конденсатори і фільтри – трансформатори – автоматичні вимикачі і перемикачі 	<ul style="list-style-type: none"> – PMUs та SCADA системи – автоматична підстанція – датчики напруги – автоматизація розподілу електроенергії – передова система керування відключеннями – керування використанням енергії (Demand Side Management) 	<ul style="list-style-type: none"> – інтелектуальні лічильники – керування енергоданими (Meter Data Management) – цінозалежне споживання (Demand Response) Мікрогріди – інтелектуальні пристрої і платформи з керування електроенергією – накопичення енергії – найновіші обмежувачі струму

Smart-технології, які дають змогу звичайним містам ставати інтелектуальними, наведено нижче [129, 160, 163]:

- 1) «інтелектуальне» публічне освітлення (Smart Lighting);
- 2) «інтелектуальні» будинки (Smart Housing);
- 3) інтегровані транспортні системи;
- 4) системи розподілення енергії (Smart Grid);
- 5) екологічна мобільність (Eco-mobility);
- 6) керування суспільним простором і ревіталізація;
- 7) відновлювані джерела енергії.

Таблиця 1.3 – Трансформація сегментів галузі електроенергетики

Аспект змін	Сегменти кола цінностей			
	Виробництво енергії, генерація	Передача, трансформація	Розподілення	Кінцеві споживачі
Технологічні тренди	<ul style="list-style-type: none"> - Віртуальні електростанції - Зростання ефективності та поширення генерації за рахунок відновлювальних джерел енергії 	<ul style="list-style-type: none"> - Технології високої напруги - Передові системи перетворення та передачі електроенергії (HVDC, FACTS) - Високопотужні провідники та високотемпературні кабелі 	<ul style="list-style-type: none"> - Моніторинг LVмереж / системи автоматизації підстанцій - Розподілені системи керування енергетичними ресурсами - Системи акумулювання енергії, в т.ч. електромобілів - Розвиток систем Microgrid 	<ul style="list-style-type: none"> - Керування попитом - Передова інфраструктура обліку - Енергоефективна інфраструктура для розумного будинку
Трансформація бізнеса	<ul style="list-style-type: none"> - Зростаючі вимоги до ефективності та екологічності 	<ul style="list-style-type: none"> - Інтеграція ринків збуту (трансграничний обмін – панєвропейський ринок, міжрегіональні ринки США) 	<ul style="list-style-type: none"> - Зміна бізнес-ролі операторів мереж - Комплексне інтелектуальне керування попитом та споживанням 	<ul style="list-style-type: none"> - Споживачі електроенергії стають виробниками (продаж надлишків енергії)
Ефекти	<ul style="list-style-type: none"> - Додаткові потужності - Забезпечення енергією віддалених ізольованих регіонів 	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження втрат 	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження пікових навантажень мережі - Зниження операційних витрат - Зниження втрат 	<ul style="list-style-type: none"> - Точний облік споживання

Технології джерел розосередженої генерації (ДРГ) застосовуються для електроживлення споживачів трьох типів, включаючи [153]:

- 1) автономне енергопостачання, за якого малі енергоустановки ДРГ використовуються відокремлено в ізольованих енергосистемах;
- 2) пікове і резервне енергопостачання на базі ДРГ у зоні дії централізованої системи;
- 3) децентралізована генерація енергії в зоні дії централізованої системи, за якої ДРГ використовуються як основне джерело, у цьому випадку його робота узгоджена з централізованою системою.

У двох останніх випадках системи розосередженої генерації набувають ряду привабливих властивостей, що дають змогу розглядати їх як основу для нової парадигми розвитку енергетики. До таких властивостей можемо віднести:

- 1) підвищення енергетичної незалежності споживачів;
- 2) згладжування пікових навантажень;
- 3) зниження рівня необхідного резервування потужності;
- 4) мінімізацію транспортування енергоносіїв;
- 5) скорочення втрат за транспортування вторинних енергоносіїв;
- 6) можливість використання місцевих енергоресурсів.

Запровадження Smart-технологій у електроенергетиці України відповідає найкращим європейським практикам і допоможе вивести керування технологічними процесами та ефективність сектору на якісно вищий рівень [157]. По-перше, Smart-технології дають змогу забезпечити кращий та варіативний облік споживання електроенергії, а це є запорукою більш раціонального споживання, зокрема керування попитом на електроенергію та підвищення енергоефективності. По-друге, оператори мереж зможуть легше та ефективніше керувати процесами виробництва, транспортування та споживання електроенергії. Це сприятиме підвищенню надійності її постачання та якості. Впровадження Smart-технологій сприятиме кращій інтеграції об'єктів відновлюваної енергетики в енергосистему та балансування їхнього змінного графіка виробництва енергії [129, 157].

1.3. Основні типи навантажень сучасних електротехнічних комплексів (Microgrid)

Завдяки технологічним інноваціям і подальшому поширенню використання електроенергії зростає різноманіття споживачів електроенергії як за потужністю, так і за характером роботи. Наприклад, стає більше електроприймачів, що відрізняються тривалістю вмикання, тобто працюють у короткочасному, повторно-короткочасному, тривалому або переривчасто-тривалому режимах.

Виділені Microgrid з різними типами ЕТК-Smart, як правило, працюють в умовах обмеження потужності вхідного джерела, а також «непередбачуваності» навантажень, що визначає їхній випадковий характер як за величиною активної потужності, так і за характером – навантаження можуть бути одно- або трифазними, збалансованими (симетричними) або незбалансованими, лінійними або нелінійними. Несиметрія і гармонічні спотворення напруги можуть викликати серйозні проблеми з обладнанням, такі як вібрація, перенапруження, перегрів тощо.

Основні типи навантажень ЕТК-Smart будемо розглядати відповідно до існуючих класифікацій електроприймачів [61, 77, 89, 94].

Під класифікацією звичайно розуміють розподіл електроспоживачів за якою-небудь ознакою або за поєднанням декількох ознак (потужності, напруги, функціями тощо). Унаслідок досить широкого використання електричної енергії в умовах сьогодення загальноприйнятої класифікації електроприймачів та електроспоживачів немає [23, 61, 77, 89].

Характеристики електроприймачів будемо розглядати як функціональну залежність між двома або більшою кількістю параметрів системи.

Для традиційних споживачів залежно від тривалості вмикання розрізняють такі режими роботи електроприймачів [23]: короткочасний, повторно-короткочасний, тривалий і переривчасто-тривалий. Короткочасним вважається режим, за якого час роботи з фактично незмінним навантаженням (t_p) чергується з часом перерви в роботі (t_n).

У короткочасному режимі працюють електродвигуни заслінок систем регулювання подачі рідин та газів, кранів та підіймальних механізмів тощо.

Повторно-короткочасний режим характеризується тим, що після декількох циклів вмикання ($t_{ц}$) за практично незмінного навантаження температура приймача коливається між значеннями τ_{\max} та τ_{\min} .

Тривалим вважається режим такої тривалості, за якої температура усіх частин електроприймача досягає сталого значення за незмінної температури оточуючого середовища. У тривалому режимі працюють насоси, вентилятори, компресори, транспортери тощо. У випадку, коли тривалий режим роботи чергується з припиненням роботи, говорять про переривчасто-тривалий режим роботи електроспоживача.

Типи індивідуальних найбільш поширених графіків навантажень наведено на рис. 1.4.

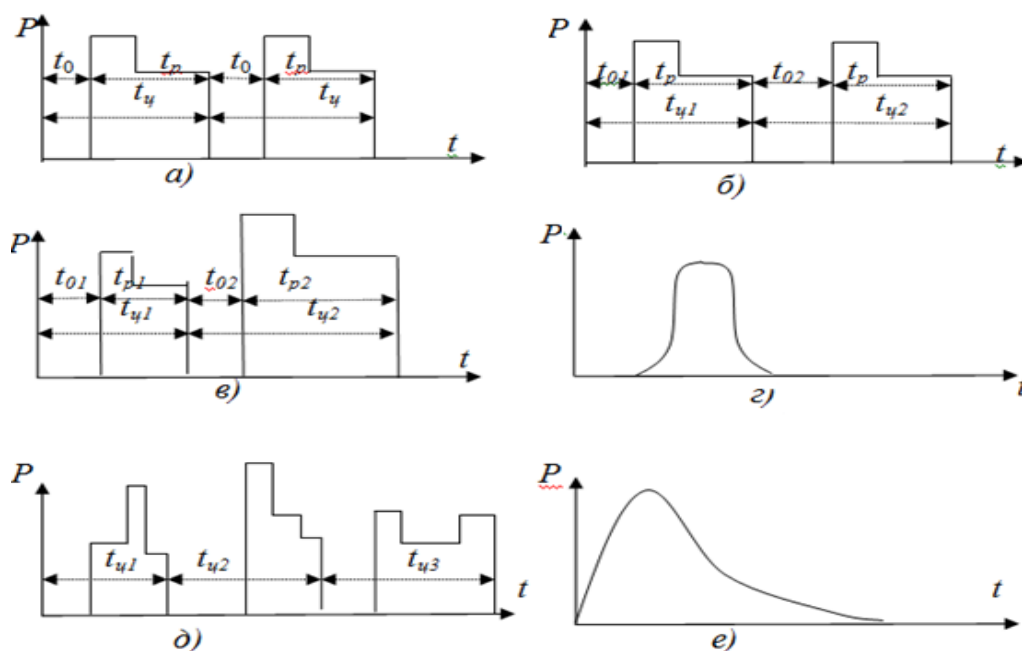


Рисунок 1.4 – Індивідуальні графіки навантажень: а – періодичний; б – циклічний; в – нециклічний; г – аперіодичний; д – нерегулярний; е – імпульсний.

Споживачів навантажень, що використовують різні види нелінійних навантажень, можна умовно поділити на три групи [61, 77].

До першої групи належать промислові споживачі, основними нелінійними

навантаженнями яких є трифазні асинхронні двигуни з регулюванням швидкості обертання за допомогою ПЕЕ, установки дугового зварювання, а також люмінесцентні лампи.

Другу групу складають споживачі, основним нелінійним навантаженням яких є однофазні джерела живлення, електроосвітлення за допомогою люмінесцентних ламп високого і низького тиску. Це офісні будівлі, навчальні заклади, підприємства АПК, які використовують у виробничому процесі, як його невід'ємну частину електроосвітлення приміщень. У цієї групи споживачів частка нелінійного навантаження може значно перевищувати лінійну складову. Такі споживачі спричиняють значні спотворення форми споживаного струму, істотну частку якого становлять компоненти з частотою третьої гармоніки. Оскільки струми з частотами порядку, кратного 3, у всіх фазах тотожні, вони підсумовуються в нейтральному проводі. У цьому разі досить імовірно перегрівання нульових проводів ліній живлення. Цю групу називають офісними (комерційними) споживачами.

До третьої групи споживачів віднесено житловий сектор. Головна особливість цього виду споживачів полягає в тому, що велика частина нелінійних навантажень є однофазною, має малу потужність і розосереджена по мережі. Таке навантаження генерує струми різко несинусоїдної форми. Як наслідок, зростання нелінійних навантажень у житловому секторі є однією з основних причин погіршення якості електроенергії. Через розподілений характер нелінійного навантаження установка фільтрокомпенсуючі пристроїв в таких мережах становить серйозну технічну проблему і вимагає значних капітальних вкладень. Для покращення якості електроенергії цих споживачів найбільш ефективні гібридні фільтрокомпенсуючих пристроїв, які є поєднанням активного і пасивного фільтрів гармонік.

На рис. 1.5 наведено графік роботи електроприймачів з повторним-короткочасним режимом роботи з впливом пускових процесів та електричного

гальмування [89]. На рис. 1.6 показано графік вхідного струму перетворювача у разі заряджання електромобілів згідно з дослідженнями, наведеними у роботі [125].

Окремий клас навантажень для ЕКТ-Smart складають навантаження на постійному струмі [47, 83, 123, 128, 135, 152, 154]. Сучасні локальні мережі постійної напруги мають цілу низку переваг. Інтелектуальні мережі постійної напруги можуть надати як постачальнику електроенергії, так і споживачеві ряд функцій. Важливим є створення знижувальних мережевих DC / DC перетворювачів великої потужності і перехід до системи електроживлення повністю на постійному струмі (англ. Total DC system) без проміжного DC / AC + AC / DC перетворення. Системи постійного струму найчастіше застосовуються саме там, де важлива компактність обладнання. Фотоелектричні сонячні станції здатні стати одними з найпопулярніших джерел енергії для тих домовласників, які хочуть менше залежати від центральних мереж.

Сьогодні для забезпечення підвищення енергоефективності все частіше пропонуються проекти мікромереж постійної напруги всередині будівлі (або декількох будівель) і на локальній території. Сучасні локальні мережі з ЕТК-Smart постійної напруги мають ряд переваг, серед яких необхідно відзначити такі [47, 83, 123, 128]:

- загальне перетворення зі змінної напруги в постійну для всіх навантажень зменшує втрати на 10–20%;
- ефективне інтегрування DLT, що є також джерелами постійної напруги (сонячні батареї, невеликі вітряні турбіни, паливні елементи та ін.);
- просте узгодження перерахованих джерел постійної напруги, що не вимагають взаємної синхронізації;
- ефективне керування графіками навантаження (включаючи накопичення електричної енергії в періоди надлишкової генерації і видачу в періоди дефіциту);
- підвищена електробезпека мереж постійного струму.

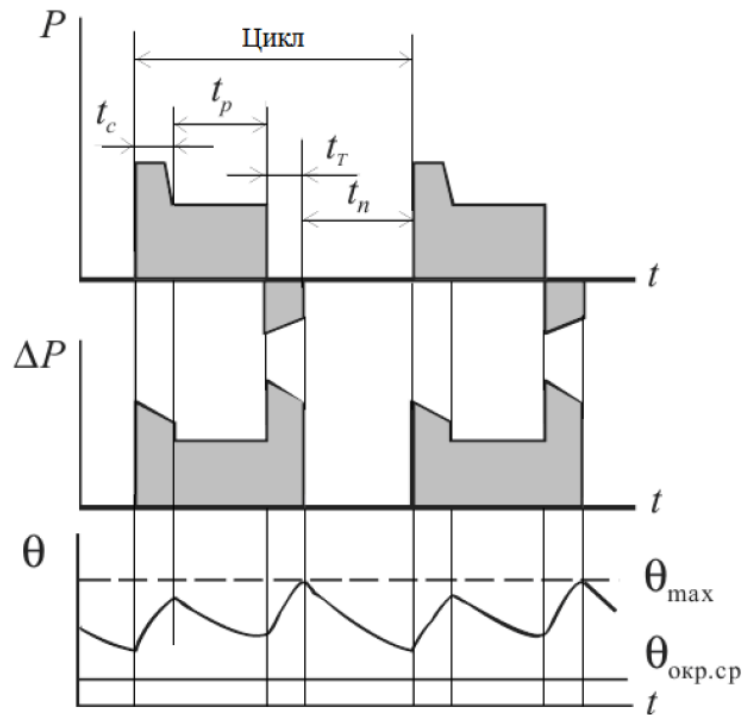


Рисунок 1.5 – Графік роботи електроприймачів з повторно-короткочасним режимом роботи з впливом пускових процесів та електричного гальмування

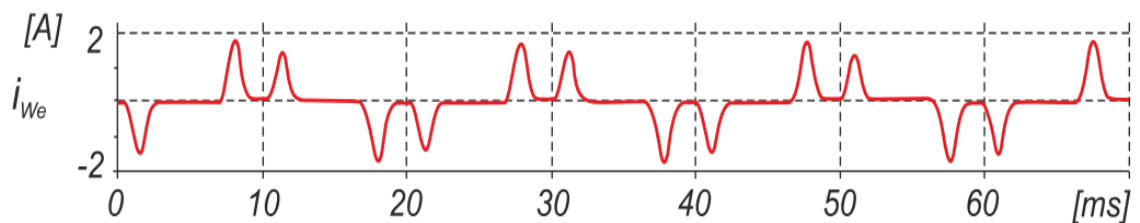


Рисунок 1.6 – Графік вхідного струму перетворювача у разі заряджання електромобілів

Застосування розподіленої мережі постійного струму дасть змогу відразу збільшити пропускну здатність існуючих розподільних мереж до чотирьох разів, і збільшити до семи разів потужності для споживача без будівництва нових генеруючих станцій і магістральних трас.

За оцінками аналітиків PWC на найближчі 25 років різні гравці енергетичного ринку, включаючи кінцевих споживачів, зможуть за рахунок

застосування постійного струму знизити свої витрати на електроенергію – як за рахунок капітальних, так і за рахунок операційних витрат – на 30%. Вони виділяють чотири основні драйвери попиту на перехід до постійного струму [154]:

- істотне зростання частки обладнання, яке працює на постійному струмі, як серед генеруючого, так і у складі споживачів;
- потреби мережевої інфраструктури в технологіях для безшовного заряджання електромобілів і передачі великих потужностей на великі відстані;
- швидкий розвиток технологій і покращення техніко-економічних показників пристроїв силової електроніки, які використовуються в системах і мережах на постійному струмі;
- появою галузевих і державних стандартів електропостачання на постійному струмі, наприклад, запропонованого EMerge Alliance в США.

На завершення розділу більш детально розглянемо поняття і сутність такого навантаження ЕКТ-Smart, як інтелектуальної будівлі (Smart Bild) [149, 154]. Головною особливістю інтелектуальної будівлі є об'єднання окремих інженерних систем і підсистем керування різних виробників в єдиний керований комплекс. Технічною основою інтелектуальних будівель є автоматизована система керування будівлею (англ. Building Management System, BMS). За побудови BMS, як правило, реалізуються три рівні автоматизації:

1. Верхній – рівень диспетчеризації і адміністрування (Management Level) з базами даних і статистичними функціями, на якому здійснюється взаємодія між персоналом (операторами, диспетчерами і т.д.) і системою через людино-машинний інтерфейс, реалізований в основному на базі комп'ютерних засобів і SCADA-систем. Цей же рівень має відповідати за інформаційну взаємодію з рівнем комплексу будівель.

2. Середній – рівень автоматичного (автоматизованого) керування (Automation Level) функціональними процесами, основними компонентами якого є контролери керування, модулі введення-виведення сигналів і різне комутаційне обладнання.

3. Нижній – «польовий» рівень (рівень кінцевих пристроїв) (Field Level) з функціями входу / виходу, що включає в себе датчики і виконавчі механізми, а також кабельні з'єднання між пристроями і нижнім-середнім рівнями.

Широке застосування СЕС у системах електроживлення обумовлює необхідність перегляду системи електропостачання будівель так, щоб використовувати постійний струм від сонячних батарей для своїх власних потреб. На рис. 1.7 наведена структура домашньої DC-мережі, яка може розглядатися як стандартна для інтелектуального будинку. На рис. 1.7 внутрішня розводка мережі постійного струму, що генерується фотоелектричною станцією (синє коло), буферною батареєю і перетворювачем електромобіля (центральна AC-мережа (червоне коло) підключена до найбільш потужних поживачів, вона також служить як резервний зарядний пристрій для акумулятора).

Важливим напрямом вдосконалення ЕКТ-Smart, підвищення їх енергоефективності, розвитку систем локального енергопостачання є широке використання перетворювачів електричної енергії (ПЕЕ) [19, 51, 52, 114–117, 138]. Це зумовлює подальше вдосконалення і відповідно ускладнення конструкції ПЕЕ, збільшення кількості їхніх типів, ускладнення форми (виду) електричних сигналів, систем керування, потребу в розширенні можливостей адаптації електричних сигналів до миттєвих параметрів локальної або загальної енергетичної системи, зумовлених зміною режимів роботи генераторів електричної енергії та особливостями технологічних процесів [4].



Рисунок 1.7 – Структура домашньої DC-мережі, яка може розглядатися як стандартна для інтелектуального будинку

Системи перетворення електричної енергії (перетворюючі системи) набули великого поширення як окремі типи у складі ЕТК-Smart [9, 51, 52, 114–117, 138]]. Інтеграція таких систем в Smart Grid здійснюється на основі Відкритого протоколу Smart Grid (OSGP). Впровадження Smart Grid в житлових мікрорайонах, для електроживлення яких застосовуються не тільки традиційні, але й альтернативні джерела електричної енергії, об'єднані в мікромережі, стимулює установку AC / DC / AC перетворювачів у кожному домогосподарстві. З їхньою допомогою вирішуються завдання перетворення видів і параметрів електричної енергії, торгівлі її надлишками, оптимального керування будинковими навантаженнями. У разі проектування ЕТК-Smart з урахуванням OSGP важливим завданням є забезпечення необхідних обмежень на польові та кондуктивні завади. Для цього необхідно проводити системний аналіз взаємного впливу великої кількості AC / DC / AC-перетворювачів за виконання ними різних функцій у складі Microgrid. Це складна науково-технічна проблема, вирішення якої можливе тільки за наявності ефективних математичних моделей об'єктів проектування.

Проведені дослідження підтверджують, що силова електроніка – ключова технологія підключення різних типів генерації електроенергії, зокрема, інтеграції ВДЕ, як джерел живлення для різних класів ЕТК-Smart [7, 51, 52, 138, 114–117]. На рис. 1.8 представлені сфери застосування пристроїв силової електроніки (ПЕЕ) [138].

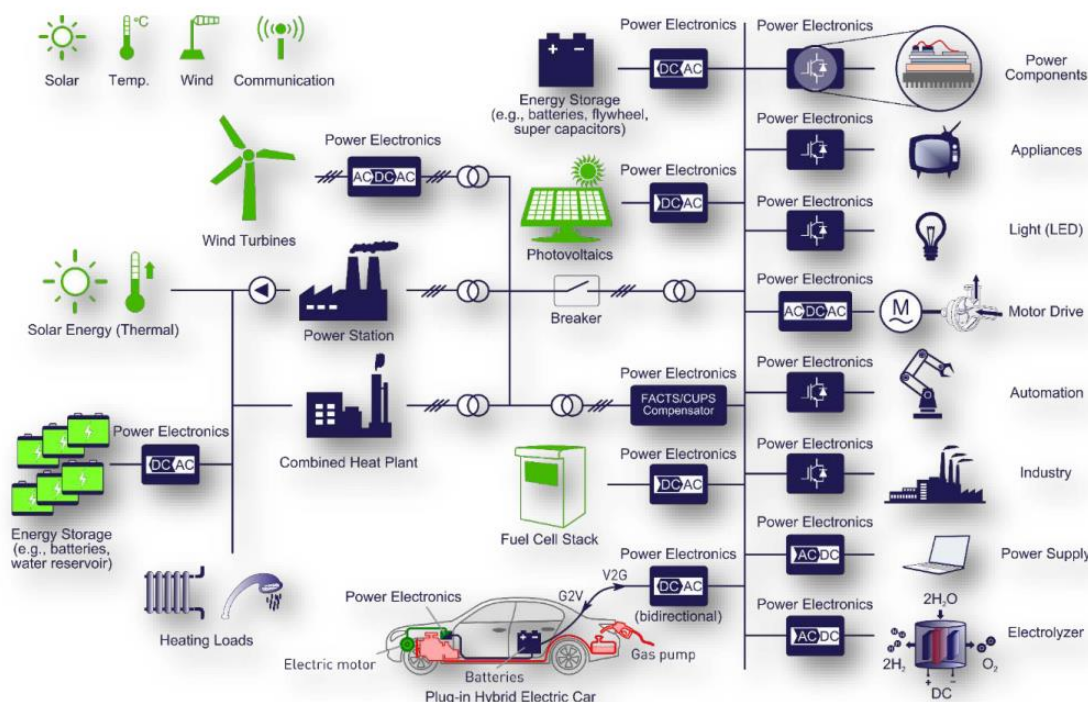


Рисунок 1.8 – Сфери застосування пристроїв силової електроніки (ПЕЕ)

За результатами проведеного аналізу можемо сформулювати такі причини різної модульованої зміни параметрів навантажень та генераторів, а у більш широкому сенсі – модульованої зміни параметрів елементів у виділених електротехнічних комплексах:

- робота у складі комплексів ВДЕ, у першу чергу генерація енергії сонячними панелями;
- зміна кількості електромобілів, які підключаються до заряджаючих пристроїв швидкого заряджання;
- паралельна робота пристроїв силової електроніки (ШП, випрямлячів,

інверторів, бітиристорних регуляторів). Їх режими відбору струму від системи можуть накладатися;

- робота електричних приладів у будинках, комерційних та бюджетних будівлях, режими яких також можуть накладатися;

- наявність високочастотних ударних технологій;

- крокові механізми, крокові двигуни;

- джерела вторинного живлення, наприклад, на основі ШП;

- паралельна робота в періодичних режимах «включено / виключено» низки навантажень (наприклад, холодильників, імпульсних навантажень);

- складні (складені) навантаження з імпульсним відбором потужності;

- комплекси з кроковими датчиками;

- електротехнології з переривчастим відбором струму різної форми;

- генерація та поширення кондуктивних завад, оцінка їхнього впливу на критичні елементи системи.

Звичайно, що процес функціонування більшості наведеного обладнання та приладів є стохастичним. Однак для окремих інженерних розрахунків (наприклад, попередньої оцінки умов функціонування, проведення експрес-аналізу) режими роботи можна представити детермінованими функціями з циклічно-змінюваними параметрами.

Висновки до розділу 1

1. Проведено комплексний аналіз сучасних тенденцій розвитку нових технологій локального електроживлення, запровадження інтелектуального керування, збільшення частки електрифікованої критичної інфраструктури, в тому числі систем життєзабезпечення, що дало змогу сформулювати основні особливості розвитку електротехнічних комплексів в умовах поширення підходу Microgrid.

2. Проаналізовано основні тенденції розширення функціональних можливостей електротехнічних комплексів у рамках окремих локальних територій з використанням Smart-технологій, що дало змогу визначити основні шляхи їх подолання для комплексного запровадження концепції SmartCity.

3. Виявлено основні напрямки запровадження електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення як базових елементів кластерної моделі електромережі з урахуванням можливостей автономної або напівавтономної роботи її окремих сегментів, а також підвищення енергоефективності та стійкості в різних умовах, що дало змогу сформулювати комплексне бачення інтеграції процесів розвитку Microgrid та загальної концепції SmartCity.

4. Визначено загальні підходи до модернізації мереж енергопостачання інфраструктури населених пунктів та розвитку електротехнічних комплексів на основі концепції Smart Grid шляхом аналізу розвитку електротехнічних комплексів як найнижчого рівня локальної енергосистеми Microgrid в рамках впровадження концепції Smart City з урахуванням впровадження сучасних технологій у галузі локальних альтернативних джерел енергії, пристроїв накопичення та збереження енергії, систем силової електроніки у сфері енергозабезпечення інфраструктури населених пунктів, що дало змогу здійснити подальший розвиток концепції формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART-КОМПЛЕКСІВ

2.1. Принципи аналізу (моделювання) ЕТК-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами

Застосування ЕТК-Smart зумовлює прискіпливу увагу до аналізу усталених та перехідних, у тому числі й модульованих, режимів у випадку формування різноманітних графіків протікання енерготехнологічних та технологічних процесів, електроживлення різноманітних типів навантажень тощо [4, 36, 43, 50, 51, 58, 59, 88, 104, 107, 127].

Різні типи ПЕЕ та навантажень в ЕТК-Smart мають різкозмінний характер споживання електроенергії. Вони обумовлюють режими, яким відповідають модульовані за амплітуди та фазою напруга і струм. Як наслідок, виникає необхідність моделювання електромагнітних процесів в ЕТК-Smart на інтервалі часу, який перевищує періоди роботи генераторів і перетворювачів (далі цей інтервал часу назвемо періодом технологічного процесу T_T), врахування у цьому разі різних типів модуляції діючих сигналів та функцій зміни параметрів елементів, врахування нелінійностей та параметричних залежностей окремих елементів, які є суттєвими для функціонування ЕТК-Smart. Виникає задача формування відповідних типів математичних моделей та алгоритмів аналізу [28–30, 40].

У переважній більшості випадків аналізу електромагнітних процесів у виділених ЕТК-Smart здійснюють шляхом лінеаризації характеристик, проте прагнення лінеаризувати всі суттєво нелінійні процеси в багатьох випадках не дає змогу вирішити поставлені задачі [16, 40, 51, 67, 71, 86, 87, 95]. Цілу низку важливих та принципових задач електротехніки та силової електроніки неможливо вирішити без врахування нелінійних залежностей. До таких випадків, наприклад, відносять кусково-постійні ступеневі зміни амплітуди коливань, збудження в генераторах вищих гармонік, захоплення частоти генератора тощо [16, 40, 51, 67].

Перехідні процеси в нелінійних електричних колах описуються

нелінійними диференціальними рівняннями, загального методу інтегрування яких не існує. На нелінійні кола не поширюється принцип суперпозиції, тому засновані на ньому методи, зокрема класичний або з використанням інтеграла Дюамеля, для розрахунку цих кіл не придатні. Аналіз перехідних режимів в ЕТК-Smart вимагає використання динамічних характеристик нелінійних елементів, які, у свою чергу, залежать від динамічних процесів, що відбуваються в них, і, отже, у загальному випадку наперед невідомі. Для інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь розроблена велика кількість різноманітних математичних методів для їхнього обчислення, орієнтованих на різні типи рівнянь.

Для задач електротехніки всі методи розрахунку за своєю сутністю можуть бути розділені на три групи [16, 40, 51, 86]:

- аналітичні методи, що припускають або аналітичний вираз характеристик нелінійних елементів, або їхню кусково-лінійну апроксимацію;
- графічні методи, основними операціями у яких є графічні побудови, часто супроводжувані допоміжними обчислювальними етапами;
- чисельні методи, засновані на заміні диференціальних рівнянь алгебраїчними для збільшень змінних за відповідні інтервали часу.

Вибір методу аналізу ЕКТ визначається структурою та характеристиками використаних моделей, елементів, які можуть бути лінійними, нелінійними та параметричними [9, 13, 40, 51, 90, 108–110]. Так, нелінійність конкретних елементів може бути суттєвою та несуттєвою. Суттєва нелінійність, на відміну від несуттєвої, частіше за все є причиною принципово нових явищ, які неможливі у лінійних колах, та у багатьох випадках лежать в основі принципу роботи пристроїв.

У випадках, коли точність аналізу ЕКТ не є необхідною, для розв'язання диференціальних рівнянь низьких порядків можна застосовувати як графічні, так і інші наближені методи [16, 40, 51]. Позитивом наближених методів є зручність їхнього практичного використання та можливість отримання розв'язку в загальному вигляді, в аналітичній формі. Це дає змогу дослідити в загальному вигляді вплив різних факторів на протікання перехідних процесів, визначити сферу

значень параметрів, які допускають практичний розв'язок, тощо. Однак для розв'язання задачі у загальному вигляді необхідно приймати додаткові припущення або обмеження, накладені або на клас схем, або на співвідношення між параметрами схеми, або на режими роботи перетворювача, або на вид збуджуючих факторів тощо.

Після широкого впровадження обчислювальної техніки розповсюдження набули чисельні методи [3, 9, 16, 51, 76, 94, 110]. Проте вони мають той же суттєвий недолік, як і графічні: отриманий розв'язок відповідає конкретному випадку, для якого задані конкретні параметри та початкові умови.

Цього недоліку немає у аналітичних методів, які хоча також звичайно є наближеними, проте існує можливість дослідження поведінки електричного кола за зміни окремих параметрів [16, 21, 40, 51, 55–57, 90, 104, 110].

Розрахунок процесів в ЕТК-Smart, як систем зі змінною структурою та параметрами елементів, зводиться до розрахунку квазіусталеного процесу. У більшості випадків електромагнітні процеси у таких схемах описуються системою звичайних диференціальних рівнянь. На кожному інтервалі сталості структури (ИСС) електромагнітні процеси описуються системою рівнянь змінних стану [11, 16, 21, 40, 51, 55–57, 90]:

$$dx_i(t)/dt = A_i x_i(t) + B_i f(t), i = 1, \dots, m; \quad (2.1)$$

$$y(t) = C_i x_i(t) + D_i f(t), i = 1, \dots, m, \quad (2.2)$$

де $x(t)$ – вектор змінних стану, елементами якого є струми індуктивностей i_L та напруги ємностей u_C ; $y(t)$ – вектор вихідних змінних; $X = dX(t)/dt$; A_i, B_i, C_i, D_i – матричні коефіцієнти, i – номер інтервала сталості структури, $i = [1, m]$, m – кількість інтервалів сталості структури.

У разі використання аналітичного опису процесів розв'язок системи рівнянь (2.1), (2.2) для i -го інтервалу надається у вигляді [16, 40]

$$x(t) = \exp(A_i(t - t_i))x(t - t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^t \exp(A_i(t - \tau))B_i f(\tau) d\tau; \quad (2.3)$$

$$y(t) = C_i \exp(A_i(t - t_{i-1}))x(t - t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^t \exp(A_i(t - \tau))B_i f(\tau) d\tau + D_i f(t),$$

де t_{i-1} та $x(t_{i-1})$ – момент початку та початкові умови змінних стану i -го ІСС.

Перевагою аналітичних методів є можливість побудови аналітичних залежностей для інтегральних характеристик, що важливо для оцінки енергоефективності роботи ЕТК-Smart в цілому.

Електромагнітні процеси у окремих типах ЕТК-Smart, які можна змодельовати моделлю з'єднання еквівалентний генератор – еквівалентне навантаження $\{G\}-\{H\}$, описуються лінійними диференціальними рівняннями з періодичною кусково-неперервною правою частиною. Розв'язок таких рівнянь можна отримати у замкнутій формі класичним кусково-припасовочним методом або у вигляді ряду Фур'є – операторним методом [35, 40, 110, 111].

Актуальним є використання методів розрахунків ЕТК-Smart, що дають змогу отримати енергетичні характеристики і параметри електроенергії у аналітичному вигляді, зокрема, метод окремих складових, адаптованих для розрахунку систем зі складними формами еквівалентних генераторів та навантажень [16, 40, 86].

На цей час для моделювання ЕТК-Smart, як систем зі змінною структурою та параметрами елементів, застосовують універсальні програми схемотехнічного моделювання або програми розрахунку електромагнітних перехідних процесів [3, 26, 40]. Аналіз несинусоїдальних режимів у таких програмах здійснюється в часовій області. За використання типових програм процедура розрахунку параметрів, що визначають якість електроенергії, є багатоступеневою: аналіз у часовій області \rightarrow визначення гармонік струму і напруги за допомогою швидкого перетворення Фур'є \rightarrow розрахунок коефіцієнтів несинусоїдальності.

Важливого значення набуває макромодельовання як окремих підсистем (підсхем), так і електромагнітних процесів [16, 51].

Як приклад наведемо рівні макромодельовання систем з ВЕС та СЕС [17, 19, 40]. На цей час існують різні моделі наведення ВЕС та СЕС в розрахунках електричних режимів які, в залежності від мети досліджень, дають змогу адекватно

відображати роботу джерел розосередженої генерації (ДРГ) [17]. У загальному випадку модель ВЕС/СЕС складається з шести рівнів деталізації, характеристика яких наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Рівні деталізації формування моделей ВЕС та СЕС

№ з/п	Рівень деталізації	Характеристика моделі представлення
1	Рівень наведення одним вузлом в ЕС	СЕС чи ВЕС наводяться одним джерелом змінної потужності на високій напрузі 110–330 кВ в енергосистемі
2	Рівень шин видачі потужності	Наведення СЕС чи ВЕС виконується узагальнено джерелами змінного струму на шинах напругою, як правило, 10–35 кВ без врахування схеми збору потужності
3	Рівень схеми збору потужності	Інвертори разом зі своїми підвищувальними трансформаторами наводяться джерелом змінного струму на шинах вищої напруги трансформатора
4	Рівень інверторних станцій ВЕС/СЕС	Розгортання моделі ВЕС/СЕС виконується до рівня шин змінного струму інверторів СЕС, інвертор є джерелом змінного струму – повне наведення схеми збору та видачі потужності ВЕС/СЕС
5	Рівень інверторів ВЕС/СЕС	Розгортання моделі виконується до рівня шин постійного струму інверторів з повним наведенням схеми збору та видачі потужності ВЕС/СЕС
6	Для СЕС – рівень панелей, для ВЕС – рівень генератора ВЕУ	Аналіз електромагнітних процесів в елементах СЕУ та ВЕУ

Функціональні можливості сучасних програм моделювання дають змогу моделювати процеси з великим ступенем адекватності результатів, у тому числі й у випадках, коли необхідно обробити велику кількість змінних [3, 26, 40]. Наприклад, оцінити роботу ЕТК-Smart на інтервалах малої тривалості за комутації напівпровідникових ключів, під час аварійних процесів тощо. Більша частина програмних комплексів, які застосовуються сьогодні, має такі складові [26]: вхідний редактор (опис схеми, введення інформації); бібліотека моделей та сигналів; формування математичної моделі схеми; вибір методів аналізу (методів чисельного інтегрування); аналіз процесів у схемі; вихідний редактор (підготовка інформації до виведення); виведення результатів аналізу.

У світовій практиці найбільшого поширення набули програма Pspice та її

модифікації, а також система Matlab [26, 40]. У цьому разі існує чимало об'єктно-орієнтованих програм, які мають переваги за вирішення завдань, але не отримали широкого застосування. Серед них слід відзначити системи ELTRAN, PARUS, а також програму CASPOC, орієнтовану на моделювання пристроїв, що поєднують електромеханічну і силову електронні частини. Слід зазначити, що застосування силових електронних пристроїв в ЕТК-Smart, як в системах більш високого рівня, також вимагає спеціальних програм для системного моделювання. Серед них можна виділити програму EMPT для моделювання електроенергетичних систем, що включають різне електротехнічне обладнання, в тому числі й силові електронні пристрої [3, 26]. Так, широко відома програма Pspice (Simulation program with integrated circuit emphasis), яка розроблена в 70-х роках XX ст. У процесі розвитку обчислювальної техніки було створено кілька її модифікацій, сьогодні вона стала основою системи наскрізного проектування електронних пристроїв Designlab.

Matlab є найбільш універсальною і такою, що постійно розвивається, системою для автоматизації науково-технічних розрахунків, аналізу і моделювання об'єктів у різних галузях науки і техніки, у тому числі й в ЕТК-Smart. Система Matlab є універсальною мовою об'єктно-орієнтованого програмування з інтерактивними засобами налагодження програм і візуалізацією інформації у вигляді графіків. Сучасні версії цієї програми містять велику кількість програмних додатків у вигляді розділів Toolbox (інструменти} для вирішення специфічних завдань. Серед цих програм особливе місце займають пакети розширення Simulink і Power System Blockset.

Пакет Simulink дає змогу ефективно вивчати роботу різноманітних систем. Етап підготовки до моделювання полягає в складанні моделі з готових закладених в Simulink елементів та налаштування параметрів системи [105]. Бібліотека пакета Simulink містить набір математичних моделей, що дають змогу досліджувати практично будь-яку електричну мережу.

На сьогодні система Matlab з відповідними додатками є найбільш ефективним засобом моделювання ЕТК-Smart та силових електронних пристроїв і

систем, побудованих на її основі.

Програма розрахунку PowerFactory, розроблена компанією DIgSILENT, є інженерним інструментом для аналізу різних типів електричних мереж, включаючи трифазні системи змінного і постійного струму, мережі низької напруги [40]. Програма здійснює моделювання динамічних та перехідних процесів, отриманого усталеного режиму, аналіз гармонік, стійкості, аварійних ситуацій, процесу пуску електродвигуна та відключення асинхронної машини. PowerFactory має інтегровану інтерактивну однолінійну графічну і інформаційну програмну оболонку, базу даних елементів електричних систем і вихідних параметрів, інтегровані функції розрахунку (наприклад, розрахунок параметрів ЛЕП та електричних машин на основі геометричних розмірів або паспортних даних тощо).

З подальшим ускладненням математичних розрахунків та одночасно розвитком комп'ютерних мереж актуальним є впровадження й онлайн-систем моделювання [40]. Одна з таких систем – це програма «Онлайн-Електрик», призначена для інтерактивного вирішення задач, що виникають у разі проектування, монтажу, оптимізації та експлуатації систем електропостачання. Перевагами онлайн-систем є відсутність необхідності встановлювати програмне забезпечення на комп'ютері, доступність системи з будь-якої точки планети, відсутність необхідності відстежувати і постійно оновлювати версії програмного забезпечення та бази даних, експорт результатів розрахунків у файли відомих форматів.

Проте якими б широкими не були можливості універсальних розрахункових систем, нерідко спеціалізовані програми мають ті чи інші переваги, а, отже, також широко розробляються та впроваджуються. Наприклад, програма «Transfor» дає змогу розраховувати трансформатори живлення, «Design tools pulse transformers» розраховує трансформатори для двотактних імпульсних джерел живлення, а програма «Rectifier 1.0» призначена для розрахунку систем з мостовими випрямлячами.

Функціональні можливості наведених програм дають змогу моделювати

процеси в ЕТК-Smart з великим ступенем адекватності результатів моделювання реальним характеристикам. У цьому випадку виникає задача оцінити роботу ЕТК-Smart на інтервалах малої тривалості, наприклад, за комутації напівпровідникових ключів, вплив різних збурюючих зовнішніх факторів, аварійних процесів тощо. Однак зростання числа оброблюваних параметрів і зростання у цьому випадку обсягу контрольованої інформації суттєво за багатоваріантних чисельних розрахунків уповільнюють швидкість дослідження процесів щодо реального масштабу часу.

Тому на сьогодні також важливою є розробка й спеціалізованих програм аналізу, які б характеризувалися підвищеною ефективністю та надавали б змогу отримувати рішення в аналітичному вигляді.

2.2. Формування часових співвідношень у моделях ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами

Розглянемо модель ЕТК-Smart, наведену системою генератор – перетворювач електричної енергії – навантаження (система $\{Г\}–\{ПЕЕ\}–\{Н\}$), де періоди роботи елементів множин генераторів $\{Г\}$, власне перетворювачів $\{ПЕЕ\}$ та навантажень $\{Н\}$ дорівнюють відповідно $T_Г$, $T_{ПР}$ та $T_Н$.

Проаналізуємо випадок, коли система характеризується циклічними процесами. Тоді кожен з елементів системи характеризується періодом роботи: відповідно $T_Г$, $T_{ПР}$ та $T_Н$, а вся система – технологічним періодом T_T [27, 29, 30, 69, 110]. Для переважної більшості режимів роботи генераторів, перетворювачів та навантажень період T_T зображується наступним чином [69]:

$$T_T = \sum_{j=1}^{n_{Г,М}} n_{Г,i} T_Г = T_Г \sum_{j=1}^{n_{Г,М}} n_{Г,i} = \sum_{j=1}^{n_{Г,М}} t_{Г,i} ; \quad (2.4)$$

$$T_T = \sum_{j=1}^{n_{ПР,М}} n_{ПР,i} T_{ПР} = T_{ПР} \sum_{j=1}^{n_{ПР,М}} n_{ПР,i} = \sum_{j=1}^{n_{ПР,М}} t_{ПР,i} ; \quad (2.5)$$

$$T_T = \sum_{j=1}^{n_{H,M}} n_{H,i} T_H = T_H \sum_{j=1}^{n_{H,M}} n_{H,i} = \sum_{j=1}^{n_{H,M}} t_{H,i} . \quad (2.6)$$

Якщо для функцій зміни напруги генератора $U_{\Gamma}(t)$ чи навантаження $U_H(t)$ на періоді T_T згідно з (2.4) – (2.6) ввести базові функції $f_{B,\Gamma}(t)$ та $f_{B,H}(t)$ (синусоїдальну, постійно ступінчасту, експоненціальну тощо), а пасивним R -, L -, C -елементам поставити у відповідність базові константи R_0 , L_0 , C_0 , то можна записати співвідношення

$$u_{\Gamma}(t) = \cup_j [u_{\Gamma,j}(t) | t \in [0, t_{\Gamma,i}], j = 1, \dots, n_{\Gamma,M}] = u_{\Gamma}(t, U_{M,\Gamma}, f_{B,\Gamma}(t), f_{\Gamma,M}(t, \Pi_{\Gamma,M}, \omega_{\Gamma,M})); \quad (2.7)$$

$$u_H(t) = \cup_j [u_{H,j}(t) | t \in [0, t_{H,i}], j = 1, \dots, n_{H,M}] = u_H(t, U_{M,H}, f_{B,H}(t), f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})); \quad (2.8)$$

$$R(t) = R(t, R_0, f_{R,M}(t, \Pi_{R,M}, \omega_{R,M})); \quad (2.9)$$

$$L(t) = L(t, L_0, f_{L,M}(t, \Pi_{L,M}, \omega_{L,M})); \quad (2.10)$$

$$C(t) = C(t, C_0, f_{C,M}(t, \Pi_{C,M}, \omega_{C,M})); \quad (2.11)$$

Циклічні процеси у системах, згідно з прийнятою вище моделлю, визначаються циклічністю роботи еквівалентного генератора, перетворювача та еквівалентного навантаження. Періоди їх роботи та співвідношення між ними визначають загальний період роботи системи T_T та відповідно циклічний характер роботи всієї системи за виконання умови кратності n_{Γ} , $n_{\Pi P}$, n_H та відповідно можливості знаходження найменшого спільного кратного $n_{НСК}$. Можливі співвідношення між періодами роботи елементів моделі наведено у табл. 2.2. У цій таблиці систематизовано можливі співвідношення між періодом T_T та періодами T_{Γ} , $T_{\Pi P}$ і T_H роботи виділених елементів системи. Кожне таке співвідношення характеризує типи режимів за № 1 – 9 роботи системи $\{\Gamma\} - \{\Pi EE\} - \{H\}$.

Величини n_{Γ} , $n_{\Pi P}$, $n_H \in N$ (натуральні числа), які задаються перед початком роботи системи або визначаються роботою системи керування чи процесами в схемі; $n_{НСК}(\dots)$ – найменше спільне кратне трьох чисел n_{Γ} , $n_{\Pi P}$, n_H . Зазначимо, що у випадку постійної напруги генератора чи постійних параметрів навантаження тривалість T_{Γ} та T_H може вибиратися довільною. Коли n_{Γ} , $n_{\Pi P}$, $n_H \notin N$, маємо змінну

тривалість періоду T_T . Тобто, якщо періоди T_G , T_{PR} чи T_H неспівмірні, то на практиці можуть бути виділені «квазіусталені» режими роботи системи $\{G\} - \{ПЕЕ\} - \{H\}$.

Вихідні напруги генератора $u_G(t)$ чи навантаження $u_H(t)$ на періоді T_T у загальному випадку розглядаються як промодульовані відповідною функцією модуляції $f_{G,M}(t, \Pi_{G,M}, \omega_{G,M})$ та $f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})$, де $\omega_{G,M}$ та $\omega_{H,M}$ – частота модуляції для генератора та навантаження; $\Pi_{G,M}$ та $\Pi_{H,M}$ – множина параметрів модуляції для генератора та навантаження. Аналіз роботи конкретних типів системи $\{G\} - \{ПЕЕ\} - \{H\}$ показав, що багато енерготехнологічних і енергетичних процесів в її елементах відбуваються за синусоїдальною з амплітудою $U_{M,G}$ ($U_{M,H}$) або постійною U_G (U_H) напругою генератора чи навантаження, що змінюються згідно з відповідною функцією модуляції $f_{G,M}(t, \Pi_{G,M}, \omega_{G,M})$ чи $f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})$ [27, 28, 30, 40, 41].

Функції модуляції $f_{G,M}(t, \Pi_{G,M}, \omega_{G,M})$ та $f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})$ можуть бути як заздалегідь відомі, так і задаватися в реальному масштабі часу системою керування чи визначатися характером протікання енерготехнологічних чи/та технологічних процесів.

З іншого боку, моделі навантаження у загальному випадку наводяться сукупністю пасивних R -, L -, C -елементів (для спрощення викладу вважається, що протиЕРС відсутні), параметри яких також модулюються функціями модуляції: $R(t) = R(t, f_{R,M}(t, \Pi_{R,M}, \omega_{R,M}))$; $L(t) = L(t, f_{L,M}(t, \Pi_{L,M}, \omega_{L,M}))$; $C(t) = C(t, f_{C,M}(t, \Pi_{C,M}, \omega_{C,M}))$, де $\omega_{R,M}$, $\omega_{L,M}$, $\omega_{C,M}$ – частота модуляції відповідно для R -, L -, C -елементів; $\Pi_{R,M}$, $\Pi_{L,M}$, $\Pi_{C,M}$ – множини параметрів модуляції відповідно. Часто навантаження моделюється RL -навантаженням за нестационарного активного опору $R(t)$.

Таблиця 2.2 – Режими роботи системи $\{\Gamma\} - \{\text{ПЕЕ}\} - \{H\}$

Номер режиму	Значення коефіцієнтів повторюваності періоду			Визначення періоду T_T
	n_Γ	$n_{\text{ПР}}$	n_H	
1	1	1	1	$T_\Gamma = T_{\text{ПР}} = T_H = T_T$
2	n_Γ	1	1	$n_\Gamma T_\Gamma = T_{\text{ПР}} = T_H = T_T$
3	1	$n_{\text{ПР}}$	1	$T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = T_H = T_T$
4	1	1	n_H	$T_\Gamma = T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T$
5	1	$n_{\text{ПР}}$	n_H	$T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T$
6	n_Γ	1	n_H	$n_\Gamma T_\Gamma = T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T$
7	n_Γ	$n_{\text{ПР}}$	1	$n_\Gamma T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = T_H = T_T$
8	n_Γ	$n_{\text{ПР}}$	n_H	$n_\Gamma T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T =$ $= n_{\text{НСК}}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H) T$ $(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H \in N)$
9	n_Γ	$n_{\text{ПР}}$	n_H	$n_\Gamma T_\Gamma \approx T_T; n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} \approx T_T; n_H T_H \approx T_T$ $(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H \notin N)$

Для узагальнення скалярні співвідношення (2.4) – (2.9) перетворимо у векторні. Для цього перепозначимо вектор діючих джерел $u_\Gamma(t)$ як $f_\Gamma(t)$ (вектор діючих напруги та струму), а сукупність амплітуд $U_{M,\Gamma}$ як вектор f_0 . Тоді вираз (2.4) набуде вигляду:

$$f_\Gamma(t) = \sum_{j=1}^{n_{\Gamma,M}} \oplus f_{\Gamma(j)}(t) = \cup_j (f_{\Gamma(j)}(t) \mid t \in [0, t_{\Gamma,j}), j = 1, \dots, n_{\Gamma,M};$$

$$[0, t_{\Gamma,j_1}) \cap [0, t_{\Gamma,j_2}) = \emptyset \text{ при } j_1 \neq j_2); \quad (2.12)$$

$$f_{\Gamma(j)}(t) = f_\Gamma(t, f_{0(j)}, f_{B,\Gamma(j)}(t), f_{M,\Gamma(j)}(t), \Pi_{\Gamma,M}, \omega_{\Gamma,M})), \quad (2.13)$$

де знак \oplus здійснює дію «додати» згідно з умовою $[0, t_{\Gamma,j_1}) \cap [0, t_{\Gamma,j_2}) = \emptyset$ у разі $j_1 \neq j_2$.

У випадку формування матричних коефіцієнтів A, B, C та D згідно з (2.1) – (2.8) для моделювання процесів на періоді T_T здійснимо таке. Для відображення

залежностей $R(t)$, $L(t)$, $C(t)$ покладемо, що величини R_0 , L_0 , C_0 , $\Pi_{R,M}$, $\Pi_{L,M}$, $\Pi_{C,M}$ є елементами вектора $\Pi_{\text{ЕЛ}}$, який поряд із функціями $f_{R,M}(t, \Pi_{R,M}, \omega_{R,M})$, $f_{L,M}(t, \Pi_{L,M}, \omega_{L,M})$ та $f_{C,M}(t, \Pi_{C,M}, \omega_{C,M})$ визначає елементи матриць A , B , C та D на j -му, $j = 1, \dots, n_{\Gamma,M}$, інтервалі модуляції сигналів діючих джерел на періоді T_T . Відповідно до типу режимів (№ 1–9, табл. 2.1) система рівнянь, яка описує процеси в системі $\{\Gamma\} - \{\text{ПЕЕ}\} - \{H\}$, відрізняється видом матричних коефіцієнтів A , B , C , D та елементів вектора діючих джерел $f_{\Gamma}(t)$ і особливістю їхнього визначення на окремих інтервалах періоду T_T , а також розрахунком самого періоду T_T .

Залежно від режиму роботи кола період T_T ділиться на підінтервали, які можна розділити на чотири підмножини, кожна з яких визначається відповідно характеристиками роботи генераторів, ПЕЕ, навантажень, характеристиками зміни інтервалів сталості структури за комутації вентильних елементів ПЕЕ. Межі підінтервалів для кожної із виділених підмножин визначаються моментами часу:

$$\begin{aligned} 1\text{-а підмножина: } & t_{\Gamma,j}, j = 1, \dots, n_{\Gamma,M}; \\ 2\text{-а підмножина: } & t_{\text{ПР},k}, k = 1, \dots, n_{\text{ПР},M}; \\ 3\text{-я підмножина: } & t_{H,l}, l = 1, \dots, n_{H,M}; \\ 4\text{-а підмножина: } & t_{i,j}, i = 1, \dots, m_j, j = 1, \dots, n_{\Gamma,M}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Якщо індексами j , k , l , i виділити підмножини на множині параметрів $\Pi_{\text{ЕЛ}} = \{\Pi_{\Gamma,j}, \Pi_{\text{ПР},k}, \Pi_{H,l}, \Pi_{\text{ПР},ji}\}$, то для матричних коефіцієнтів A , B , C , D можна записати залежності:

$$\begin{aligned} A\{\Pi_{\text{ЕЛ}}\} &= A\{\Pi_{\Gamma,j}, \Pi_{\text{ПР},k}, \Pi_{H,l}, \Pi_{\text{ПР},ji}\} = A_{jkli}; \\ B\{\Pi_{\text{ЕЛ}}\} &= B\{\Pi_{\Gamma,j}, \Pi_{\text{ПР},k}, \Pi_{H,l}, \Pi_{\text{ПР},ji}\} = B_{jkli}; \\ C\{\Pi_{\text{ЕЛ}}\} &= C\{\Pi_{\Gamma,j}, \Pi_{\text{ПР},k}, \Pi_{H,l}, \Pi_{\text{ПР},ji}\} = C_{jkli}; \\ D\{\Pi_{\text{ЕЛ}}\} &= D\{\Pi_{\Gamma,j}, \Pi_{\text{ПР},k}, \Pi_{H,l}, \Pi_{\text{ПР},ji}\} = D_{jkli}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Значення параметрів $\Pi_{\Gamma,j} \equiv \Pi_{\Gamma}(t'_j)$; $\Pi_{\text{ПР},k} \equiv \Pi_{\text{ПР}}(t'_k)$; $\Pi_{H,l} \equiv \Pi_H(t'_l)$ та $\Pi_{\text{ПР},ij} \equiv \Pi_{\text{ПР}}(t'_{ij})$ є незмінними відповідно на інтервалах часу, що характеризуються такими нерівностями:

$$\begin{aligned} 1\text{-а підмножина: } & t_{j-1} \leq t'_j < t_j \text{ за умови } t_0 \equiv t_{n_{\Gamma,M}}; \\ 2\text{-а підмножина: } & t_{k-1} \leq t'_k < t_k \text{ за умови } t_0 \equiv t_{n_{\text{ПР},M}}; \end{aligned} \quad (2.16)$$

3-я підмножина: $t_{l-1} \leq t_l' < t_l$ за умови $t_0 \equiv t_{nH,M}$;

4-а підмножина: $t_{j-1,i-1} \leq t_{ji}' < t_{ji}$ за умови $t_{0i} \equiv t_{n\Gamma,M,i}$ та $t_{j,0} \equiv t_{j,mj}$.

Об'єднаємо сукупність моментів часу, задану співвідношеннями (2.14), (2.16), в множину $\{t^*\}$. Частина елементів множини $\{t^*\}$ у загальному випадку є невідомою та визначається електромагнітними процесами у колі, сигналами від системи керування, сукупністю вибраних критеріїв та обмежень, змінами характеристик технологічних процесів. У цьому разі невідомими можуть бути не тільки чисельні значення моментів часу, але й якісні співвідношення між ними типу “>” (більше) та “<” (менше). Систематизація елементів множини $\{t^*\}$ (упорядкування за співвідношеннями “>” та “<”) дає змогу сформувати вектор-стрічку $[t^*]$ розмірністю $1 \cdot n_{MX}$, де $n_{MX} \leq M^*$ (окремі моменти часу можуть бути тотожними або співпадати за визначеною точністю обчислень). На початковому етапі для упорядкування елементів множини $\{t^*\}$ доцільно використати розрахунок перехідних електромагнітних процесів.

Залежність матриць A , B , C , та D від нелінійних елементів залежностей $R(i)$, $L(i)$, $C(u)$ будемо описувати як їхньою залежність від функцій $x(t)$ та $dx(t)/dt$.

2.3. Особливості побудови моделі ЕТК-Smart за різних співвідношень між періодами роботи елементів моделі

Знаходження T_T полягає у визначенні періоду роботи всієї системи. У разі неспівмірних періодів роботи елементів моделі доцільно виокремлювати квазістаціонарні інтервали роботи системи. У разі незмінного характеру роботи визначення періоду роботи елемента моделі визначається довільно.

Наведемо класифікацію математичних моделей схем. Відповідно до [16, 86] виділимо чотири групи моделей схем, додатково ввівши п'яту групу моделей зі змінною кількістю комутацій:

1) кола з постійними структурою та параметрами протягом всіх інтервалів періоду роботи; дискретні зміни можливі лише для функції генератора та їхній характер і моменти часу заздалегідь відомі (група I);

2) кола, зміна структури та (або) параметрів яких відбувається у заздалегідь відомі моменти часу шляхом комутації вентилів за допомогою СК (група II);

3) кола зі змінною структурою, яка змінюється за заздалегідь відомим порядком комутації вентилів у заздалегідь невідомі моменти часу, що залежать від комутації вентилів та визначаються як СК, так і напругою та струмом окремих гілок кола (група III);

4) кола зі змінною структурою, яка змінюється за заздалегідь невідомим порядком комутації вентилів у заздалегідь невідомі моменти часу, що залежать від комутації вентилів та визначаються як СК, так і напругою та струмом окремих гілок кола (група IV);

5) кола зі змінною структурою, яка змінюється за заздалегідь невідомим порядком та кількістю комутацій у заздалегідь невідомі моменти часу, що залежать від комутації вентилів та визначаються як СК, так і значеннями та формою напруг і струмів окремих гілок кола (група V).

Актуальність додавання п'ятої групи кіл до класифікації визначається швидким розвитком ЕТК-Smart та їхніх систем керування, а також багатоступінчастих перетворювачів, коли кількість комутацій може змінюватись залежно від форми сигналу.

Слід також зазначити особливості матриць пасивних елементів A , B , C та D . У наведеній класифікації елементи цих матриць є постійними коефіцієнтами, відрізняється лише кількість елементів матриць залежно від кількості комутацій, проте окремим є випадок, коли елементи матриць є нелінійними та (або) параметричними. Такий випадок значно розширює сферу застосування, однак значно ускладнюється процедура розв'язання отриманих рівнянь. Тому системи з такими елементами у разі моделювання доцільно зводити до систем з постійними значеннями пасивних елементів.

Розглянемо особливості побудови кожного з випадків співвідношення між періодами роботи елементів моделі. Тут і далі будемо використовувати зміну елементів за i , $i = 1, \dots, m$ як зміну інтервалів сталості структури всередині періоду;

зміну елементів за j , $j = 1, \dots, n$ ($j = 1, \dots, n_{\Gamma, M}$, $j = 1, \dots, n_{\Pi, M}$, $j = 1, \dots, n_{H, M}$, $j = 1, \dots, n_{HCK, M}$) для узгодження періодів роботи елементів моделі $\{\Gamma\} - \{\Pi\} - \{H\}$ (T_{Γ} , T_{Π} , T_H відповідно) з технологічним періодом T_T . $n_{HCK, M}$ – найменше спільне кратне від $n_{\Gamma, M}$, $n_{\Pi, M}$, $n_{H, M}$ – тут і далі використовується для узгодження T_{Γ} , T_{Π} , T_H через узгоджений період T_T .

Слід зазначити, що всі елементи рівнянь (A , B , C , D , $f(t)$) можуть залежати від j , тобто змінюватися залежно від номера періоду роботи елемента моделі, але незмінні відповідно до номера у різних T_T .

Наведені в табл. 2.2 режими зведемо до трьох типових груп режимів і розглянемо особливості:

1) Режим 1: $n_{\Gamma, M} = n_{\Pi, M} = n_{H, M} = 1$, $T_{\Gamma} = T_{\Pi} = T_H = T_T$ є найпростішим. Рішення мають такий вигляд:

$$dx_i(t)/dt = A_i x_i(t) + B_i f(t), i = 1, \dots, m; \quad (2.17)$$

$$y(t) = C_i x_i(t) + D_i f(t), i = 1, \dots, m, \quad (2.18)$$

де визначення коефіцієнтів матриць A , B , C , та D здійснюється за методикою, описаною у підрозділі 2.2. Тут у будь-якому разі відсутня зміна елементів за j , проте може бути кілька інтервалів сталості структури; можливі групи (групи I–IV) схем відповідно до наведеної вище класифікації, а також випадок параметричної залежності чи нелінійності пасивних елементів схеми. Останній випадок можливий для всіх варіантів співвідношень між періодами роботи елементів моделі $\{\Gamma\} - \{\Pi\} - \{H\}$ і відрізняється лише видом коефіцієнтів матриць: $A_{(j)i}(x(t), dx(t)/dt, \Pi_{EL})$, $B_{(j)i}(x(t), dx(t)/dt, \Pi_{EL})$, $C_{(j)i}(x(t), dx(t)/dt, \Pi_{EL})$, $D_{(j)i}(x(t), dx(t)/dt, \Pi_{EL})$.

2) Режими 2, 3, 4. Ці режими згруповано за відмінністю одного з коефіцієнтів повторюваності періоду – n_{Γ} , n_{Π} , n_H – від одиниці, тоді як інші дорівнюють одиниці.

Режим 2, коли $n_{\Gamma} > 1$, $n_{\Pi} = 1$, $n_H = 1$, $n_{\Gamma} T_{\Gamma} = T_{\Pi} = T_H = T_T$ докладно розглянуто у

[16, 86, 110]. У загальному випадку вирази для $x_i(t)$, $y(t)$ мають такий вигляд:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i}x_i(t) + B_{(j)i}f_{(j)}(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{\Gamma, M}; \quad (2.19)$$

$$y(t) = C_{(j)i}x_i(t) + D_{(j)i}f_{(j)}(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{\Gamma, M}. \quad (2.20)$$

Режим 3: $n_{\Gamma}=1$, $n_{\Pi P} > 1$, $n_H = 1$, $T_{\Gamma} = n_{\Pi P}T_{\Pi P} = T_H = T_T$. Цей випадок за розрахунками практично аналогічний попередньому, за винятком незмінності функції генератора $f(t)$ залежно від номера періоду роботи перетворювача. Для I–IV груп моделей схем характерна циклічна зміна матричних коефіцієнтів A , B , C , D , цикл відповідає періоду роботи перетворювача. У загальному випадку вирази для $x_i(t)$, $y(t)$ мають такий вигляд:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i}x_i(t) + B_{(j)i}f(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{\Pi P, M}; \quad (2.21)$$

$$y(t) = C_{(j)i}x_i(t) + D_{(j)i}f(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{\Pi P, M}. \quad (2.22)$$

Тут і далі залежність m від j , тобто від номера періоду роботи ПЕЕ всередині технологічного періоду T_T і відповідає групі V, коли кількість комутацій ПЕЕ залежить від значень та форм напруг та струмів окремих гілок кола. У цьому разі маємо змінні стану та вихідні характеристики, залежні від номера періоду роботи генератора (у цьому випадку, в інших випадках це можуть бути інші елементи моделі або зведені періоди). Така залежність можлива лише для випадків, коли $n_{\Pi P} > 1$.

Режим 4: $n_{\Gamma}=1$, $n_{\Pi P}=1$, $n_H > 1$, $T_{\Gamma} = T_{\Pi P} = n_H T_H = T_T$. Цей випадок за розрахунками повністю аналогічний попередньому, за винятком відсутності залежності m від j :

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i}x_i(t) + B_{(j)i}f(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{H, M} \quad (2.23)$$

$$y(t) = C_{(j)i}x_i(t) + D_{(j)i}f(t); i=1, \dots, m; j=1, \dots, n_{H, M} \quad (2.24)$$

3) Режими 5, 6, 7, 8. Для цих режимів характерно кілька повторностей періодів двох елементів моделі схеми $\{\Gamma\} - \{\Pi\} - \{H\}$ всередині технологічного періоду T_T . Для спрощення розрахунків тут вводиться n_{HCK} . Для всіх цих режимів

присутня циклічна зміна матричних коефіцієнтів A , B , C , D для I–IV груп схем.

Для режиму 5, $n_\Gamma = 1$, $n_{\text{ПР}} > 1$, $n_H > 1$, $T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T = n_{\text{НСК}}(n_{\text{ПР}}, n_H) T$.

Вигляд виразів для $x_i(t)$, $y(t)$ аналогічний режиму 3, формули (2.21), (2.22), за винятком визначення $j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}$:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i} x_i(t) + B_{(j)i} f(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_{\text{ПР}}, n_H) \quad (2.25)$$

$$y(t) = C_{(j)i} x_i(t) + D_{(j)i} f(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_{\text{ПР}}, n_H) \quad (2.26)$$

Для режиму 6, $n_\Gamma > 1$, $n_{\text{ПР}} = 1$, $n_H > 1$, $n_\Gamma T_\Gamma = T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T = n_{\text{НСК}}(n_\Gamma, n_H) T$. Вигляд виразів для $x_i(t)$, $y(t)$ аналогічний режиму 2, за винятком визначення $j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}$:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i} x_i(t) + B_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_H) \quad (2.27)$$

$$y(t) = C_{(j)i} x_i(t) + D_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_H) \quad (2.28)$$

Для режиму 7, $n_\Gamma > 1$, $n_{\text{ПР}} > 1$, $n_H = 1$, $n_\Gamma T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = T_H = T_T = n_{\text{НСК}}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}) T$.

Вигляд виразів для $x_i(t)$, $y(t)$ аналогічний режиму 2, за винятком визначення $j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}$ та залежності m від j :

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i} x_i(t) + B_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}); \quad (2.29)$$

$$y(t) = C_{(j)i} x_i(t) + D_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}). \quad (2.30)$$

Для режиму 8, який є найбільш узагальненим, $n_\Gamma > 1$, $n_{\text{ПР}} > 1$, $n_H > 1$, $n_\Gamma T_\Gamma = n_{\text{ПР}} T_{\text{ПР}} = n_H T_H = T_T = n_{\text{НСК}}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H) T$. Для нього характерні всі особливості попередніх режимів: можливість циклічної зміни функції генератора $f_{(j)}(t)$, циклічної зміни матричних коефіцієнтів A , B , C , D , для I–IV груп схем. Наведемо вирази для $x_i(t)$, $y(t)$:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i} x_i(t) + B_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H); \quad (2.31)$$

$$y(t) = C_{(j)i} x_i(t) + D_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{\text{НСК},M}(n_\Gamma, n_{\text{ПР}}, n_H). \quad (2.32)$$

У результаті аналізу визначено такі особливості побудови систем рівнянь:

– зведення кількості повторюваності періодів роботи різних елементів моделі $\{\Gamma\} - \{\text{ПЕЕ}\} - \{H\}$ до найменшого спільного кратного, яке визначає

кількість узгоджених періодів;

– можливість різної кількості комутацій у ПЕЕ за один технологічний період у різних періодах роботи ПЕЕ.

Наведені особливості побудови систем рівнянь притаманні не лише для випадку побудови рівнянь за методом змінних стану, а й за іншими методами, зокрема за методом окремих складових з використанням перетворення Лапласа [28, 29].

Введення для пасивних матриць A, B, C, D наскрізного індексу (для функцій $f_{\Gamma}(t)$ залишаємо початкові індекси без змін) потребує перекодування індексів параметрів елементів. Для цього згідно з елементами вектора $[t^*]$ здійснюється перекодування елементів матриці $A_{jkli}, B_{jkli}, C_{jkli}, D_{jkli}$ з поточним (наскрізним) індексом r , де моменту часу $t^*_r, r = 1, \dots, n_{MX}$, відповідає індекс r ($A_{jkli} = A_{ri}; B_{jkli} = B_r; C_{jkli} = C_r; D_{jkli} = D_r$). Тоді можемо записати

$$dx/dt = A_r x + B_r f_{\Gamma(j)}(t); \quad (2.33)$$

$$y = C_r x + D_r f_{\Gamma(j)}(t), \quad (2.34)$$

де $r = 1, \dots, n_{MX}; j = 1, \dots, n_{\Gamma, M}$.

Зазвичай у разі відомої функції зміни вхідної напруги за допомогою ПЕЕ у сформованих моделях $\{\Gamma\}-\{\text{ПЕЕ}\}-\{H\}$ можна перейти до більш спрощеної моделі «еквівалентний генератор» – «еквівалентне навантаження» (система $\{\Gamma\}-\{H\}$), де періоди роботи елементів множин генераторів $\{\Gamma\}$ та навантажень $\{H\}$ дорівнюють відповідно T_{Γ} , та T_H . У табл. 1.2 систематизовано можливі співвідношення між періодом T_T та періодами T_{Γ} і T_H роботи для виділених елементів системи. Кожне таке співвідношення характеризує типи режимів за № 1–5 роботи системи $\{\Gamma\}-\{H\}$, позначення та застереження аналогічні до табл. 2.3.

Таблиця 2.3. – Режими роботи системи $\{Г\}-\{Н\}$

Номер режиму	Значення коефіцієнтів повторюваності періоду		Визначення періоду T_T
	n_G	n_H	
1	1	1	$T_G = T_H = T_T$
2	n_G	1	$N_G T_G = T_H = T_T$
3	1	n_H	$T_G = n_H T_H = T_T$
4	n_G	n_H	$n_G T_G = n_H T_H = T_T$
5	n_G	n_H	$n_G T_G \approx T_T; n_H T_H \approx T_T (n_G, n_H \notin N)$

У разі розрахунку електромагнітних процесів у перетворювачах з нестационарним, періодично змінюваним навантаженням найбільш складним є режим, коли періоди перемикання вентилів у ПЕЕ та навантаження є неспівмірними (режим 5, табл. 2.3). У цьому випадку усталений процес у системі не існує, а приблизне значення квазіусталеного процесу можна знайти через розрахунок перехідного процесу. Виходячи з цих міркувань, розглянуто режим роботи системи, коли періоди роботи еквівалентного генератора та еквівалентного навантаження є кратними до періоду роботи системи (режим 4, табл. 2.3).

2.4. Методи розрахунку ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії з еквівалентними генераторами та навантаженнями

Якщо для лінійних кіл методи та алгоритми аналізу і синтезу досить повно розроблені, існують загальні підходи, то для нелінійних кіл вже постає питання вибору оптимального методу аналізу.

Ефективним напрямком у разі аналізу процесів у таких системах та оптимізації режимів їх роботи є використання аналітичних та чисельно-аналітичних співвідношень, що дає змогу здійснювати багатоваріантні розрахунки. Для цього досить успішно використовуються аналітичні методи аналізу, зокрема,

метод окремих складових (МОС) та його модифікації [3,16, 51, 86, 87].

Випадок, коли період роботи генератора та навантаження співпадає, є найпростішим і розглянутий у багатьох роботах [16, 51, 86]. Окрім того, у [16, 33, 51, 86] наведено методику розрахунку кіл з синусоїдальним генератором та нестационарним циклічно змінюваним активно-індуктивним навантаженням, де змінюється активний опір. Задача розрахунку усталеного режиму у перетворювачах з великою кратністю частот зовнішньої дії та комутації вентилів може бути вирішена методом різницевих рівнянь на основі застосування неперервно-дискретної форми наведення діючих функцій [100]. У свою чергу, розрахунок усталеного режиму в перетворювачах з великою кратністю частот зовнішньої дії та комутації вентилів може бути здійснений методом різницевих рівнянь на основі застосування неперервно-дискретної форми наведення діючих функцій [16, 42, 86].

За розрахунку електромагнітних процесів у перетворювачах з нестационарним, періодично змінюваним навантаженням найбільш складним є випадок, коли періоди переключення ключів перетворювача та навантаження є неспівмірними, тобто, не можна знайти такі цілі числа $n_{\bar{A}}, n_H$, коли $n_{\bar{A}}T_{\bar{A}} = n_H T_H = T_T$ [56, 57]. У цьому випадку усталеного процесу у системі не існує, а приблизне значення квазіусталеного процесу можна знайти через розрахунок перехідного процесу.

Розрахунок квазіусталених процесів на основі рішень диференціального рівняння базується на попередньому перетворенні початкового диференціального рівняння з періодичними коефіцієнтами у рівняння з постійними коефіцієнтами. Таке перетворення здійснюється за допомогою метода Ляпунова [16, 51]. Квазіусталені процеси на основі такого підходу можна знайти у мережних перетворювачах змінної напруги (перетворювачі зі змінною структурою), що працюють на стаціонарне навантаження. Проте для рівнянь, що описують процеси у перетворювачах постійної напруги зі змінною структурою та періодичним навантаженням, застосування метода Ляпунова стає неможливим.

Проведений аналіз показав, що одними з найбільш перспективних

аналітичних методів розрахунку електричних кіл на основі перетворень Лапласа є метод окремих складових [16, 51, 86]. Цей метод дає змогу отримати рішення рівнянь за знаходженням струму в електричних схемах при квазіусталених процесах у замкненій формі. Він базується на застосуванні для розв'язку лінійних диференціальних рівнянь з кусково-неперервною періодичною діючою функцією неперервного перетворення Лапласа.

Метод окремих складових і його модифікація призначені для розрахунку миттєвих значень струму та напруги в перетворювачах, еквівалентні схеми яких вміщують генератори еквівалентних кусково-безперервних періодичних ЕРС (струмів) і схеми заміщення навантажень з постійною структурою і постійними параметрами [16, 51, 86].

Необхідність використання цього методу обумовлена такими причинами. По-перше, за розрахунку процесів методом припасовування в точках розриву діючих функцій необхідно визначати початкові умови для проведення розрахунків на кожному наступному інтервалі безперервності. По-друге, за розрахунку процесів в аналітичному вигляді з використанням звичайної методики перетворення Лапласа розв'язок отримуємо у вигляді нескінченного ряду Фур'є, що ускладнює подальші розрахунки інтегральних характеристик.

Розглянемо аналітичну форму розрахунку струму та напруги елементів ЕТК-Smart. Задача розрахунку процесів, які протікають у вибраному колі, формулюється так. Ця еквівалентна схема ЕТК-Smart (див. рис. 2.1), яка містить джерело кусково-безперервної періодичної ЕРС $e_E(t)$ та навантаження у вигляді лінійного RLC -кола. Необхідно розрахувати усталений $i_Y(t)$ та перехідний $i_{II}(t)$ струми навантаження.

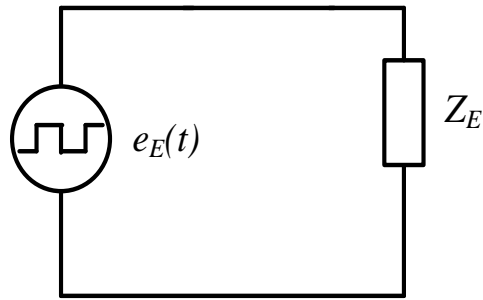


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема ЕТК-Smart

Розв’язок методом окремих складових дає змогу уникнути стикування рішень, отриманих на окремих інтервалах безперервності діючих функцій, і забезпечує наведення розв’язку у замкненому вигляді. Суть методу окремих складових базується на такому.

Математична модель еквівалентної схеми є рівнянням (2.1). Застосовуючи до нього пряме перетворення Лапласа, отримаємо рівняння

$$Z(p)I(p) = E(p),$$

де $Z(p) = \sum_k a_k p^k$; $p = d/dt$; $E(p)$ – зображення кусково-неперервної періодичної функції, розв’язуючи яке, знаходимо операторне зображення реакції кола на прикладений вплив $I(p) = E(p)/Z(p)$, де $Z(p)$ – операторний опір навантаження.

Результат обчислення оригіналу реакції кола $i(t)$ за зображенням $I(p)$ залежить від полюсів зображення $E(p)$ та коренів полінома $B(p)$ зображення $Z(p)$. Зазначимо, що полюси, які лежать лівіше осі j (див. рис. 2.2), визначають вільну складову процесу. Полюси діючої функції, які лежать на осі j , визначають усталену складову, обумовлену впливом $E(p)$, корені полінома $B(p)$ навантаження $Z(p)$, які лежать на осі j , – усталену складову, що визначається безпосередньо навантаженням.

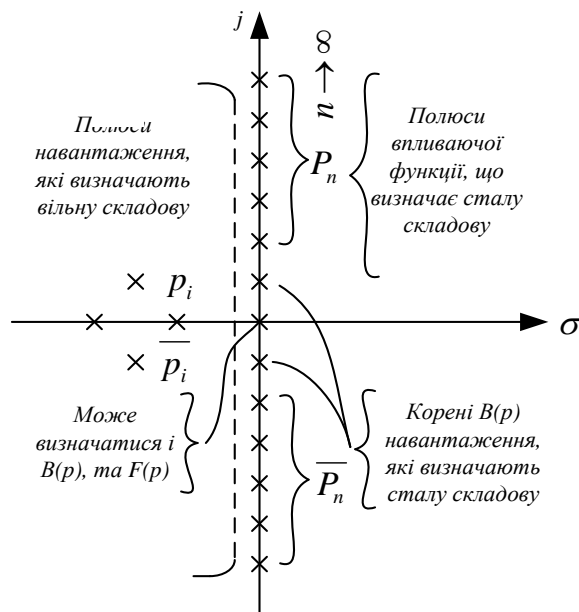


Рисунок 2.2 – Полюси зображення $E(p)$ та коренів полінома $B(p)$ зображення $Z(p)$

Для розв'язання цим методом рівняння (2.1) його замінюють зображенням за Лапласом:

$$X(p)B(p) = F(p)A(p), \quad (2.35)$$

де $A(p) = \sum_{k=0}^q a_k p^k$; $B(p) = \sum_{k=0}^s b_k p^k$; $F(p)$ – зображення кусково-неперервної періодичної

діючої функції $f(t)$; $F(p) = \int_0^T \frac{f(t)e^{-pt} dt}{1 - e^{-pT}}$; T – період; $p = d/dt$.

Квазіусталений розв'язок рівняння (2.35) знаходиться у вигляді двох складових за часовою областю. Перша складова розв'язку визначається відносно полюсів схеми та функції впливу інтервалу неперервності, який розглядається, продовженої до нескінченності. Друга складова визначається відносно полюсів схеми за впливу на неї всієї кусково-неперервної функції.

На відміну від операторного методу, де розв'язок знаходиться відносно полюсів схеми та діючої функції, у методі окремих складових замкнутий розв'язок на окремих інтервалах знаходиться у вигляді різниці двох складових. Перша складова розв'язку визначається відносно полюсів схеми та функції впливу інтервалу неперервності, який розглядається, подовженої до нескінченності. Друга

складова визначається відносно полюсів схеми за впливу на неї всієї кусково-неперервної функції. Незважаючи на переваги цього методу, він має той недолік, що розв'язок необхідно визначати стільки разів, скільки інтервалів неперервності містить період функції впливу.

У методі окремих складових за визначення усталеного струму на інтервалі безперервності діючої функції здійснюється віднімання у часовій області (в області оригіналів) вільної складової з повного перехідного процесу інтервалу, що досліджується. Оскільки розв'язок здійснюється в області оригіналів, то він повторюється для кожного інтервалу безперервності.

Якщо звернути увагу на те, що зображення розривної періодичної функції є виразом, який містить злічену кількість складових, і описує в області зображення розривну функцію, яка визначена на всій часовій осі $0 \leq t \leq \infty$, то природно, що й усталена складова реакції навантаження на періодичну кусково-безперервну дію також в області зображень буде описуватися деякою функцією, яка вміщує злічену кількість складових. Використовуючи ту ж ідею, згідно з якою усталений процес є різницею перехідного процесу і вільної складової реакції навантаження, можна визначити зображення усталеного процесу, а потім знайти і його оригінал.

Власне модифікований метод окремих складових дає змогу формалізувати знаходження усталеної реакції кола і знаходити розв'язок одночасно для всіх інтервалів безперервності діючої функції. Ці переваги методу дають можливість ефективно використовувати ЕОМ для розрахунку процесів у перетворювачах, які моделюються еквівалентними схемами з постійною структурою, постійними параметрами та генераторами еквівалентних ЕРС.

Використання аналітичних функцій має свої перспективні напрямки застосування. Так, аналітичні вирази дають можливість, без багатократного повторення чисельного інтегрування вихідної системи диференціальних рівнянь, провести багатоваріантні розрахунки, здійснити побудову макромоделей. В окремих випадках за результатами чисельних розрахунків можуть бути здійснені апроксимації функцій $E_{\text{ЕКВ}}(t)$ та $Z(t)$, що дасть змогу отримати наближені

аналітичні вирази, які в аналітичному вигляді описують процеси в околі виділеного базового розв'язку. Тобто є можливість апроксимації чисельних розрахунків аналітичними функціями для визначення аналітичних розв'язків у виділених межах допустимих рішень (зміни параметрів генератора, навантаження).

За модифікацією МОС у разі аналізу процесів у системах електроживлення з циклічно змінюваними параметрами (знаходження струму згідно з (2.25)) та врахуванням тривалості технологічного процесу T^* важливо здійснити побудову зображення Лапласа для складних періодичних функцій та умови нестационарності навантажень.

Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано основні принципи моделювання електротехнічних комплексів шляхом виокремлення еквівалентних генераторів, перетворювачів електроенергії та навантажень шляхом розгляду особливостей різних методів аналізу, що дає змогу врахувати співвідношення їх періодів роботи між собою та відповідно до загального періоду роботи електротехнічного комплексу.

2. Розглянуто особливості роботи електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами шляхом врахування змін параметрів еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень, що дає змогу здійснювати моделювання відповідних електричних кіл за допомогою аналітичних методів. Визначено основні підходи до формування моделей ЕТК-Smart шляхом визначення кратності роботи еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень і відповідних співвідношень між періодами роботи елементів електротехнічних комплексів.

4. Проаналізовано основні групи методів розрахунку електромагнітних процесів у електротехнічних комплексах з циклічно змінюваними параметрами шляхом аналізу відповідності вимогам щодо можливості формування відповідних типів математичних моделей та алгоритмів аналізу.

5. Досліджено переваги аналітичних методів, зокрема методу окремих складових, шляхом визначення можливості отримання результатів розрахунку в замкненому вигляді та відсутності необхідності визначення початкових умов у разі переходу від одного інтервалу безперервності діючої функції до іншого, що дає змогу здійснювати розрахунки усталених процесів в еквівалентних схемах з постійними структурою та змінними параметрами.

РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕТК-SMART

3.1. Побудова зображень і оригіналів струмів для складних функцій напруги генераторів ЕТК-Smart на базі функції рівня

Розглянемо різні види складних періодичних функцій напруги еквівалентних генераторів ЕТК-Smart, що утворюються з елементарних математичних функцій, які назвемо базовими. Запишемо їх та їхні зображення у табл. 3.1 та будемо використовувати такі позначення типів функцій у подальшому розгляді як для позначення базових функцій, так і для позначення складних періодичних функцій, в основі яких лежать відповідні базові функції (як буде видно з подальшого розгляду, з базових функцій лише функція типу 1 застосовується за побудови зображень всіх типів складних періодичних функцій, інші базові функції застосовуються для побудови зображень лише відповідного їм типу складних періодичних функцій) [28–30, 40, 41].

Загальний підхід до побудови зображень Лапласа для складних періодичних функцій у випадку постійної тривалості інтервалів інтегрування детально розглянуто в роботах [16, 40, 51]. Зображення $F_{II}(p)$ функції сигналу $u(t)$ для випадку прямокутних імпульсів амплітудою U_i має такий вигляд:

$$F_{II}(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.1)$$

Коли інтервали апроксимації функції мають різну тривалість, тобто $T_i = \text{var}$, що є більш узагальненим випадком, зображення функції сигналу знаходиться таким чином:

$$F_{II}(p) = \frac{1}{p} \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i (e^{-pT_{(i-1)}} - e^{-pT_i}), \quad (3.2)$$

за умови, що $T_{II} = \sum_{i=1}^n T_i$, $T_0 = 0$.

Таблиця 3.1 – Базові функції та їхні зображення

Тип	Назва	Базова функція $f_{Б,i}(t)$	Зображення $F_{Б,i}(t)$
1	Функція рівня	$f_{Б,1}(t) = A$	$F_{Б,1}(t) = \frac{A}{p}$
2	Синусоїдальна функція	$f_{Б,2}(t) = \sin \omega t$	$F_{Б,2}(t) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
3	Експоненціальна функція	$f_{Б,3}(t) = e^{-\sigma t}$	$F_{Б,3}(t) = \frac{1}{p + \alpha}$
4	Функція прямої пропорційності	$f_{Б,4}(t) = At$	$F_{Б,4}(t) = \frac{A}{p^2}$

Розрахунки згідно з (3.2) у порівнянні з (3.1) складніші, проте у окремих випадках саме здійснення апроксимації функції сигналу генератора може спростити розрахунки, зменшивши кількість інтервалів апроксимації за рахунок об'єднання інтервалів з однаковими амплітудами ступінчастих імпульсів.

За побудови модульованих функцій та функцій сигналу, для апроксимації яких необхідно застосувати кілька базових функцій, необхідно використовувати чергування базової функції з паузою для утворення складної базової функції. У такому випадку $T_i + T_{0i} = T_{\Pi}$, де T_i – тривалість базової функції, T_{0i} – тривалість паузи. У цьому разі $F_i(0+t) \equiv F_i(T_i + T_{0i} + t)$. Тоді зображення функції сигналу має вигляд:

$$F_{\Pi}(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-2(i-1)pT}. \quad (3.3)$$

Зсув всієї функції здійснюється за теоремою запізнювання шляхом домноження на e^{-pT} [91, 111]. Слід зазначити, що у разі апроксимації кількома базовими функціями необхідно дотримуватися вимоги $F_i(f_{ei}, T_i) \cap F_j(f_{ej}, T_j) = \emptyset$, де $i \neq j$ та $i, j \in \{1, \dots, n\}$, тобто вимоги однозначності визначення зображення функції на інтервалі.

Побудуємо зображення складних періодичних функцій, утворених на основі

базових функцій відповідно до табл. 3.1.

Розглянемо функції, в основі яких лежать функція рівня, синусоїдальна функція, експоненціальна функція та функція прямої пропорційності [28 – 30].

Побудова зображень і оригіналів струмів для складних функцій генератора на базі функції рівня

Складні періодичні функції типу 1. Розглянемо перший етап розв’язання задачі знаходження $i(t)$ за допомогою перетворення Лапласа – пошук зображень функцій $e(t)$. Для цього використаємо теорему запізнювання, згідно з якою

$$f(t - t_0) = e^{-pt_0} F(p). \quad (3.4)$$

Періодизація окремих складових відбувається так: згідно з теоремою запізнювання зображення періодизованої функції $F_1(p)$ матиме вигляд

$$F(p) = F_1(p)(1 + e^{-pT} + e^{-p2T} + \dots) = \frac{F_1(p)}{1 - e^{-pT}}, \quad (3.5)$$

де T – період повторення функції $F_1(p)$.

Нехай функція $e(t)$ має вигляд, зображений на рис. 3.1. Знайдемо зображення ступінчастої імпульсної функції, період якої складається з трьох прямокутних імпульсів, $T_{\Pi} = 3T$, $i = 1, 2, 3$.

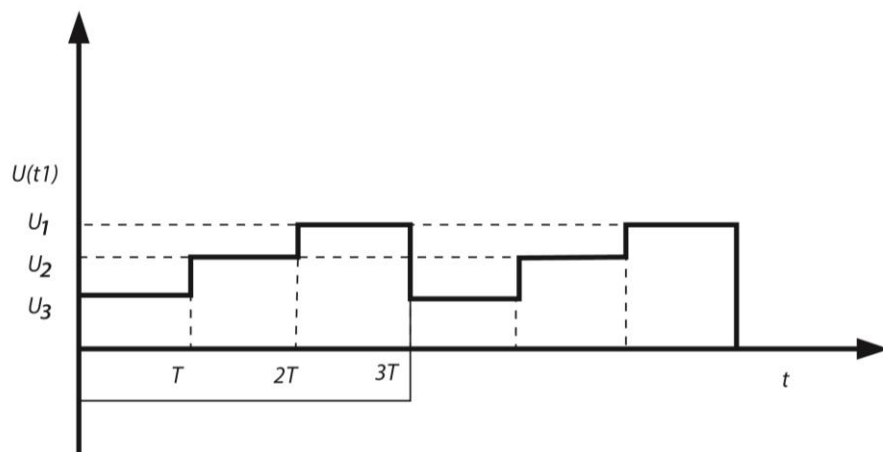


Рис. 3.1 – Вигляд функції напруги генератора

Функцію, зображену на рис. 3.1, можна отримати шляхом періодичного повторення трьох прямокутних імпульсів заданих амплітуд, кожен з яких у свою чергу за теоремою запізнювання утворюється з двох прямокутних функцій 1 та 2 (див. рис. 3.2):

$$F(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-pT}) e^{-pT}. \quad (3.6)$$

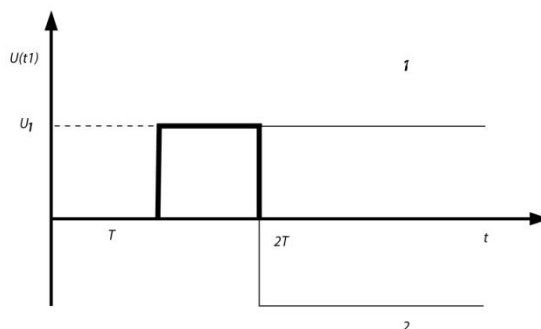


Рис. 3.2 – Вигляд функції прямокутного імпульсу

Кожен період T_n утворюється сумою трьох імпульсів:

$$F_n(p) = F_1(p) + F_2(p) + F_3(p) = \sum_{i=1}^3 F_i(p), \quad (3.7)$$

де $F_i(p)$ формується за формулою (3.6).

Задана функція (див. рис. 3.2) матиме вигляд

$$F(p) = \frac{F_1(p) + F_2(p) + F_3(p)}{1 - e^{-pT_n}}. \quad (3.8)$$

Запишемо $F_1(p)$, $F_2(p)$, $F_3(p)$ з урахуванням формули (3.6) в табл. 3.2.

Узагальнимо формули з таблиці для i вкладених періодів:

$$F_T(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-pT}) \sum_{i=1}^3 U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.9)$$

Для усталеного періодичного режиму роботи системи (3.9) запишеться

$$F(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^3 U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.10)$$

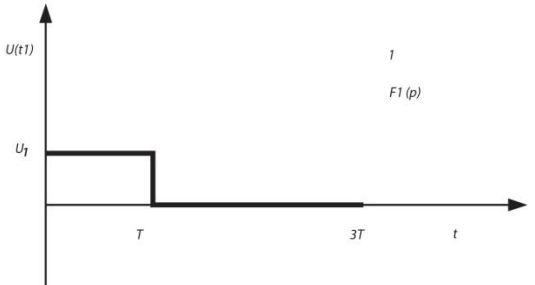
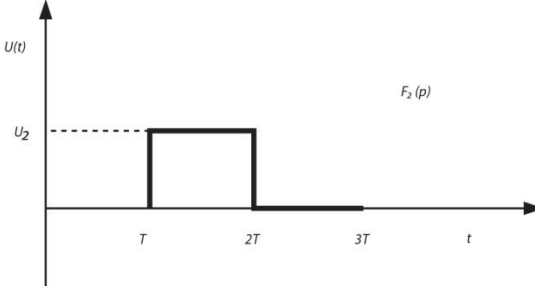
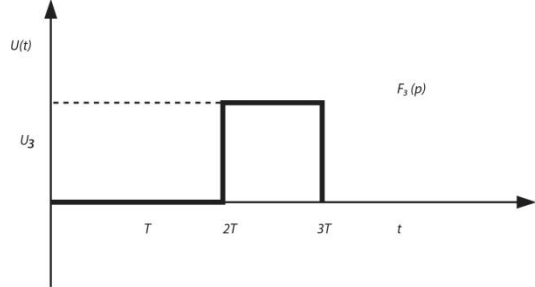
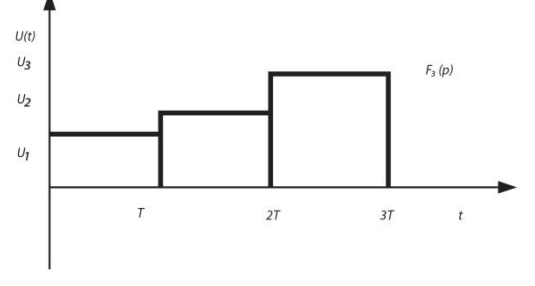
Формулу (3.5) можна узагальнити для випадків n ступінчастих імпульсів у періоді:

$$F(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.11)$$

Побудова зображень опору навантаження здійснюється шляхом визначення активного опору в області зображень R , індуктивного опору в області зображень pL та ємнісного опору в області зображень $\frac{1}{pC}$. Відповідно до випадку, що

розглядається у роботі, маємо випадок RL -навантаження, що є у області зображень $Z(p) = R + pL$.

Таблиця 3.2 – Імпульсні функції та їх зображення

№ з/п	Вид функції	Зображення F_i
1		$F_1(p) = U_1 \frac{1}{p} (1 - e^{-pT})$
2		$F_2(p) = U_2 \frac{1}{p} (e^{-pT} - e^{-2pT}) =$ $= U_2 \frac{1}{p} e^{-pT} (1 - e^{-pT})$
3		$F_3(p) = U_3 \frac{1}{p} (e^{-2pT} - e^{-3pT}) =$ $= U_3 \frac{1}{p} e^{-2pT} (1 - e^{-pT})$
4		$F_{\Pi}(p) = F_1(p) + F_2(p) + F_3(p) =$ $= \sum_{i=1}^3 F_i(p)$

У більш узагальненому випадку розглянемо випадок різних значень активного опору на різних інтервалах роботи схеми [28–30]. Для врахування цього на кожному інтервалі зображення навантаження має різні значення:

$$Z_i(p) = R_i + pL, \quad (3.12)$$

де i – номер інтервалу.

Зображення струмів на інтервалах знаходиться відповідно до закону Ома, що діє і в області зображень:

$$I_i(p) = \frac{U_i}{Z_i}. \quad (3.13)$$

Особливості реалізації алгоритму знаходження оригіналів струмів покажемо на прикладі. Знайдемо оригінали струмів за допомогою оберненого перетворення Лапласа. Розглянемо випадок, коли період роботи системи складається з двох інтервалів ($n=2$), $U_1 = U$, $U_2 = 2U$, $R_1 = R$, $R_2 = R$, $Z(p) = R + pL$. Тоді зображення струму

$$I_1(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = \frac{U(1 - e^{-pT})(1 + 2e^{-pT})}{p(1 - e^{-2pT})(R + pL)}. \quad (3.14)$$

Оригінал струму на інтервалі знаходиться як різниця перехідного $i_{p,i}(t)$ (що є результатом роботи генератора на інтервалі, який розраховується) та вільного (що є результатом роботи генераторів на всіх інших інтервалах, крім того, який розраховується) $i_{v,i}(t)$ струмів:

$$i_i(t) = i_{p,i}(t) - i_{v,i}(t). \quad (3.15)$$

Визначимо перехідний струм $i_{p,1}(t)$. У разі визначення перехідного струму враховуються складові функції генератора, які діють лише на інтервалі, що розраховується. Для розрахунку лишків використовуються всі корені знаменника як корені, що визначаються навантаженням, так і корені, що визначаються генератором. Тоді отримуємо

$$i_{p,1}(t) = R \operatorname{Res} \frac{U}{p(R + pL)} e^{pT} \Big|_{p_1=0} + R \operatorname{Res} \frac{U}{p(R + pL)} e^{pT} \Big|_{p_2=-\frac{R}{L}} = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}). \quad (3.16)$$

Визначимо вільний струм $i_{v,1}(t)$. За розрахунку лишків використовуються лише корені, що визначаються навантаженням. Тоді отримуємо

$$i_{V,1}(t) = R \frac{U(1-e^{-pT})(1+2e^{-pT})}{p(1-e^{-2pT})(R+pL)} e^{pT} \Big|_{p=-\frac{R}{L}} = -\frac{U}{R} \frac{2-2e^{-\frac{R}{L}T} + e^{-\frac{R}{L}T} - e^{-2\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (3.17)$$

Відповідно до (3.15) – (3.17) усталений струм навантаження на першому інтервалі має такий вигляд:

$$i_1(t) = \frac{U}{R} \left[1 - e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{2-2e^{-\frac{R}{L}T} + e^{-\frac{R}{L}T} - e^{-2\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t} \right]. \quad (3.18)$$

Розкладемо вираз (3.18) на доданки:

$$i_1(t) = \frac{U}{R} \left[1 - e^{-\frac{R}{L}t} + \left(\frac{2}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} - \frac{2e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} + \frac{e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} - \frac{e^{-\frac{R}{L}T}e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} \right) e^{-\frac{R}{L}t} \right]. \quad (3.19)$$

Проаналізуємо вираз (3.19) за кожним доданком; для цього представимо (3.19) у вигляді:

$$i_1(t) = \frac{U}{R} [A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6], \quad (3.20)$$

де

$$A_1 = 1; A_2 = -e^{-\frac{R}{L}t}; A_3 = \frac{2}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t};$$

$$A_4 = -\frac{2e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t}; A_5 = \frac{e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t}; A_6 = -\frac{e^{-\frac{R}{L}T}e^{-\frac{R}{L}T}}{(1-e^{-2\frac{R}{L}T})} e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Зауважимо, що перші два доданки A_1 , A_2 утворюють перехідний струм і визначаються параметрами лише поточного першого інтервалу. Доданки A_3 , A_4 , A_5 та A_6 , які утворюють вільний струм, визначаються параметрами елементів схеми на всіх інтервалах. Додатні доданки визначають вільні струми, що утворюються за вимкнення імпульсу напруги, від'ємні – за ввімкнення. Швидкість спадання залежить від параметрів навантаження на інтервалах (тут наведено випадок для постійного значення навантаження, випадок для нестационарного навантаження

буде розглянуто далі). Так, доданок A_3 показує спадання лише на поточному першому інтервалі, доданки A_4 , A_5 , крім цього, – на попередньому до значення часу $t=T$ (тобто на другому), а доданок A_6 , окрім поточного першого, – на попередньому другому інтервалі попереднього періоду до значення часу $t=T$ та на першому інтервалі попереднього періоду – до значення часу $t=T$. Відповідно функції спадання визначаються параметрами елементів на відповідних інтервалах (спочатку розглянемо перший період), для якого можемо записати:

$$i_{O,1}(t) = \frac{U}{R} \left[1 - e^{-\sigma_1 t} + (2 - 2e^{-\sigma_2 T} + e^{-\sigma_2 T} - e^{-\sigma_2 T} e^{-\sigma_1 T}) e^{-\sigma_1 t} \right], \quad (3.21)$$

де $\sigma_i = R_i / L$.

Перейдемо до випадку, коли навантаження змінюється на кожному інтервалі $R_i = \{R_i | t \in [t_{i-1}, t_i), \cup t \in [t_{i-1}, t_i) = T_{II}, R(t) = R(t + T_{II})\}$. Для наочності візьмемо функцію напруги виду, зображеного на рис. 3.2. Виходячи з формули (3.10), на першому інтервалі вільний струм запишеться так:

$$i_{V,1}(t) = -(I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t}, \quad (3.22)$$

де $I_i = U_i / R_i$.

Виходячи з попередніх міркувань, знайдемо вираз для вільного струму для усталеного режиму через нескінченну кількість інтервалів після початку роботи системи та зведемо нескінченний ряд до замкненого вигляду:

$$\begin{aligned} i_{V,1}(t) = & -((I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t} + \\ & + (I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})(e^{-\sigma_1 T}e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t} + \\ & + (I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})(e^{-2\sigma_1 T}e^{-2\sigma_2 T}e^{-2\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t} + \\ & + (I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T}) \times \\ & \times (e^{-3\sigma_1 T}e^{-3\sigma_2 T}e^{-3\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t} + \dots) = \\ & = -(I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t} \times \\ & \times (1 + e^{-\sigma_1 T}e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T} + e^{-2\sigma_1 T}e^{-2\sigma_2 T}e^{-2\sigma_3 T} + e^{-3\sigma_1 T}e^{-3\sigma_2 T}e^{-3\sigma_3 T} + \dots) = \\ & = -\frac{(I_3(1 - e^{-\sigma_3 T}) + I_2(1 - e^{-\sigma_2 T})e^{-\sigma_3 T} + I_1(1 - e^{-\sigma_1 T})e^{-\sigma_2 T}e^{-\sigma_3 T})e^{-\sigma_1 t}}{1 - e^{-(\sigma_1 T + \sigma_2 T + \sigma_3 T)}}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

З циклічності повторюваності інтервалів маємо тотожність $i + n \equiv i$.

Зробимо узагальнення формули (3.23) для i -го інтервалу при $n=3$ для будь-якої кількості інтервалів у періоді:

$$i_{V,i}(t) = -\frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)T}} (I_{i-1+n}(1 - e^{-\sigma_{i-1+n}T}) + I_{i-2+n}(1 - e^{-\sigma_{i-2+n}T})e^{-\sigma_{i-1+n}T} + \dots + I_{i-n+n}(1 - e^{-\sigma_{i-n+n}T})e^{-\sigma_{i-1+n}T}e^{-\sigma_{i-2+n}T} \dots e^{-\sigma_{i-(n-1)+n}T}). \quad (3.24)$$

У формулі (3.24) множник $e^{-\sigma_i t}$ визначає спадання струму на поточному інтервалі, за допомогою множника $\frac{1}{1 - e^{-\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)T}}$ враховується нескінченна кількість попередніх періодів роботи системи, а величина $I_i(1 - e^{-\sigma_i T})$ враховує спадання струмів попереднього інтервалу (поточний інтервал вважається першим інтервалом поточного періоду) [46].

Запишемо формулу (3.25) у вигляді, зручному для алгоритмізації та машинних розрахунків, та врахуємо можливість різних тривалостей міжкомутаційних інтервалів τ_i :

$$i_{V,i}(t) = -\frac{e^{-\alpha_i t}}{1 - e^{-\left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \tau_k\right)}} \cdot \left[I_{i-1+n}(1 - e^{-\alpha_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}) + \sum_{j=2}^n \left(I_{i-j+n}(1 - e^{-\alpha_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} \right) \right]. \quad (3.25)$$

Розрахунок перехідних струмів здійснюється за наведеною вище методикою:

$$i_{P,i}(t) = Res \frac{U_i}{p(R_i + pL)} e^{pT} \Big|_{p_1=0} + Res \frac{U_i}{p(R_i + pL)} e^{pT} \Big|_{p_2=-\sigma_i} = \frac{U_i}{R_i} (1 - e^{-\sigma_i t}). \quad (3.26)$$

Тоді струми навантаження визначаються формулою (3.6).

Відповідно до співвідношень (3.15), (3.25), (3.26), відмінність полягає лише у обчисленні вільних струмів, що доцільно виконувати за формулою (3.25) або безпосередньо через обчислення лишків з урахуванням підстановки відповідних коренів. Формула (3.25) є узагальненим випадком формули (3.7), і при незмінному навантаженні отримуємо формулу (3.7).

На основі формул (3.15), (3.25), (3.26) було розроблено алгоритм розрахунку струмів.

У Додатку Г наведено розрахунок зображення напруги у разі складної

імпульсної функції сигналу генератора на основі функції рівня (рис. 3.3).

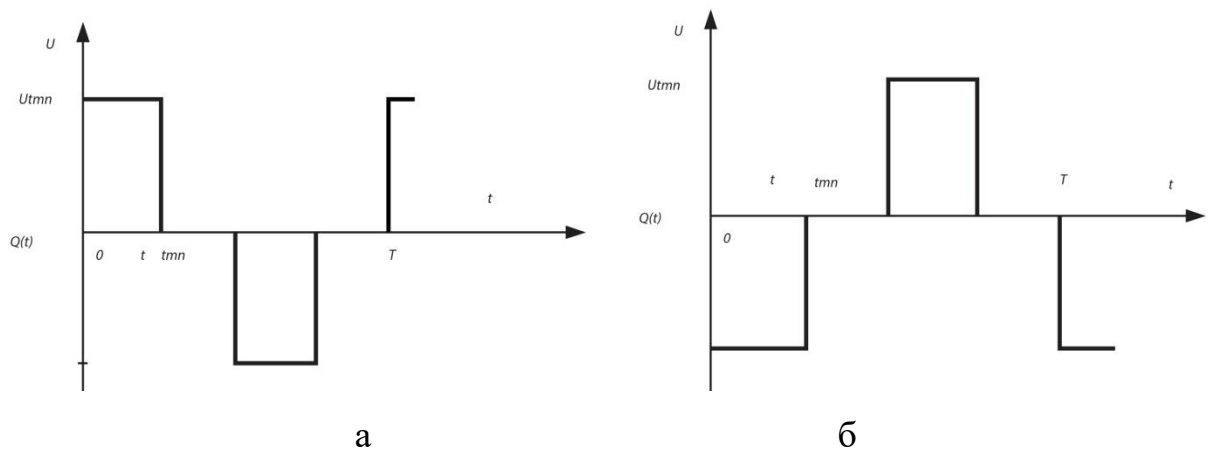


Рис. 3.3 – Вигляд імпульсної функції рівня

Для відображення особливостей аналізу за врахування умови нестационарності навантаження у Додатку Г розглянуто також випадок, коли у разі дії генератора напруги складної форми на основі функції рівня (див. рис. 3.4) активно-індуктивне навантаження має змінні параметри активного опору. Інтервали зміни параметрів схеми мають однакову тривалість $T_T = 6T$.

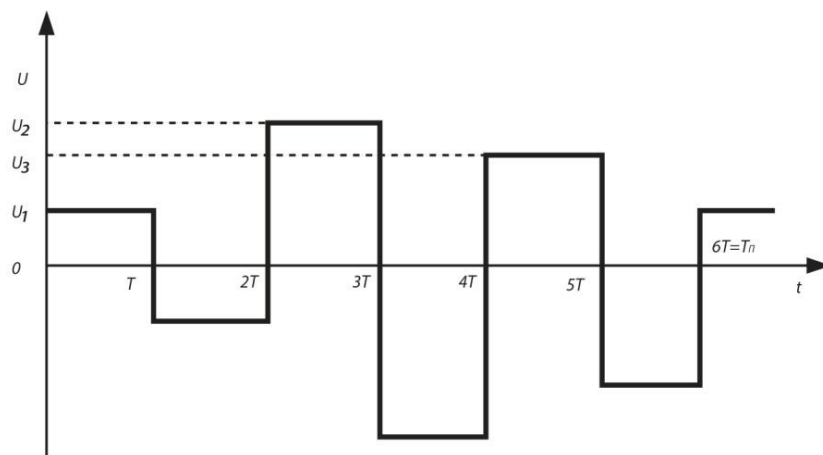


Рис. 3.4 – Вигляд періодичної імпульсної функції

Розглянемо приклад розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора, коли загальний період роботи схеми складає $T_T = 8T_0$, значення $L = 0,01$ Гн, $T_0 = 0,02$ с, амплітуда напруги завади $U = 20$ В, а активний опір та напруга змінюються на кожному інтервалі, у першому випадку активний опір спадає на

кожному півперіоді роботи схеми (графіки наведено на рис. 3.5), у другому випадку – зростає (графіки наведено на рис. 3.6). Значення R та U наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення R та U за розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора

Випадок 1	Номер інтервалу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
U_i	20	40	60	20	-20	-60	-40	-20
Випадок 1 R_i	60	50	30	20	60	50	30	20
Випадок 2 R_i	20	30	50	60	20	30	50	60

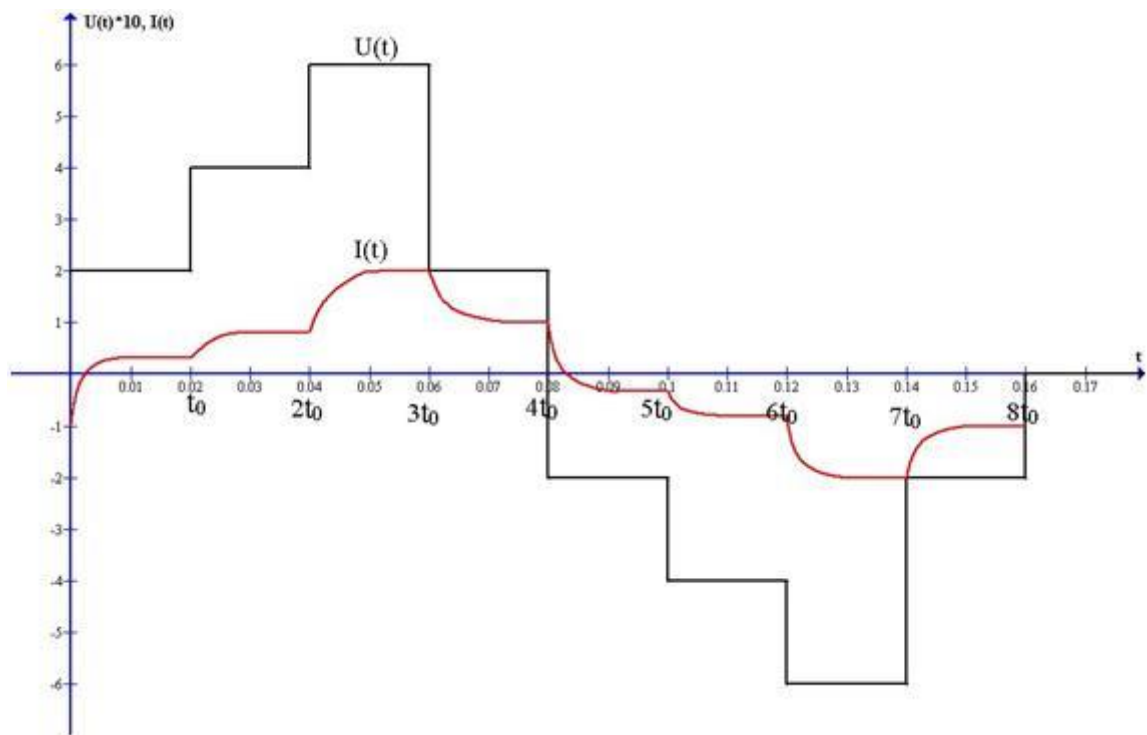


Рис. 3.5 – Графік напруги та струму заводи у разі зменшення активного опору

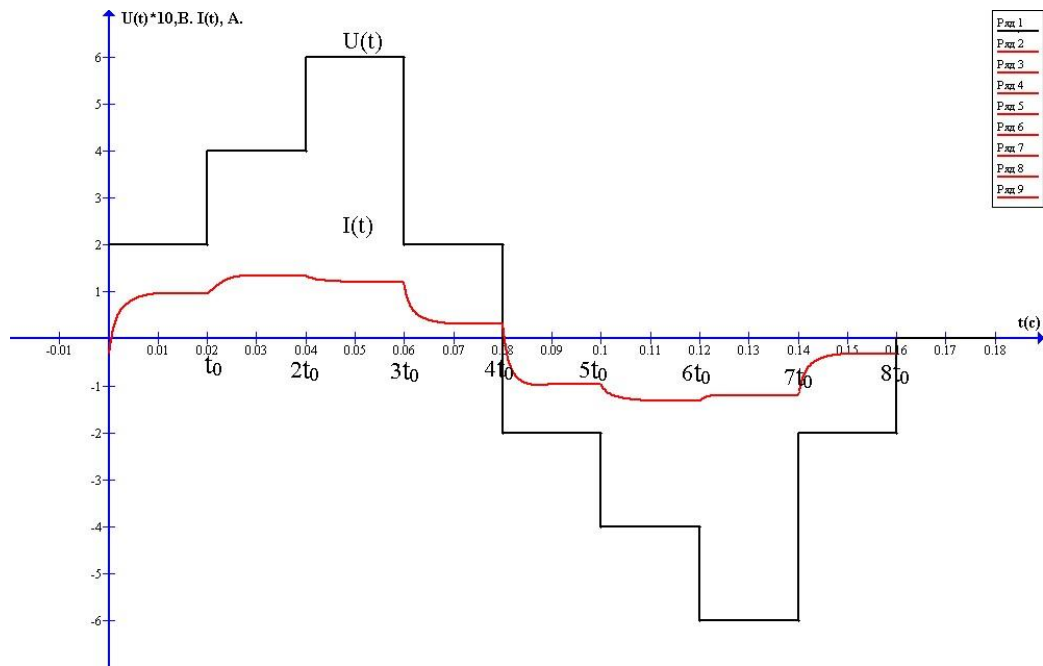


Рис. 3.6 – Графік напруги та струму завади у разі зменшення активного опору

3.2. Побудова зображень функцій: синусоїда, експонента, пилоподібна імпульсна функція

Розглянемо найбільш використовувані найпростіші математичні функції за апроксимації електричних сигналів та характеристик складного вигляду: синусоїда, експонента, пилоподібна імпульсна функція, зображення яких відомі [91].

Докладно розглянемо побудову зображення функції, що складається з функцій інтервалу експоненціального вигляду, після чого запишемо зображення для інших функцій у вигляді таблиці. Розглянемо низу функцій експоненціального характеру, що можуть характеризувати, наприклад, протікання електромагнітних процесів у реактивних елементах (заряд та розряд) (рис. 3.7):

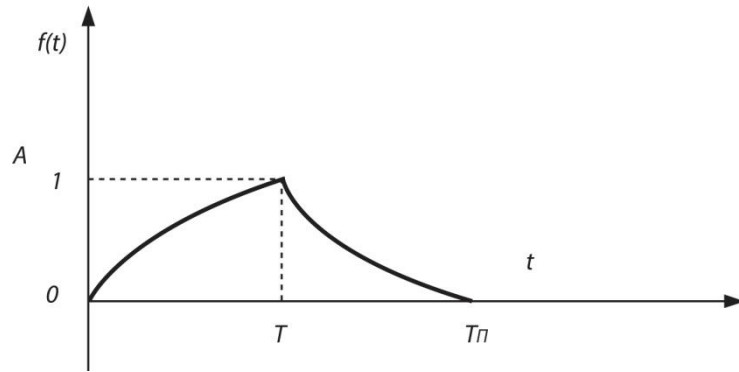


Рисунок 3.7 – Експоненціальна функція, яка описує протікання електромагнітних процесів у реактивних елементах (заряд та розряд)

Таку функцію можна отримати шляхом періодичного повторення суми двох складених функцій для кожного внутрішнього часового інтервалу. Розглянемо побудову зображення цієї функції більш докладно.

Для першого інтервалу, за теоремою запізнювання, що утворюється додаванням чотирьох функцій (1, 2, 3, 4) (рис. 3.8), де

$$A = \frac{1}{1 - e^{-\alpha T}}, \quad B = \frac{e^{-\alpha T}}{1 - e^{-\alpha T}}, \quad C = -\frac{e^{-\alpha T}}{1 - e^{-\alpha T}}, \quad D = -\frac{1}{1 - e^{-\alpha T}}$$

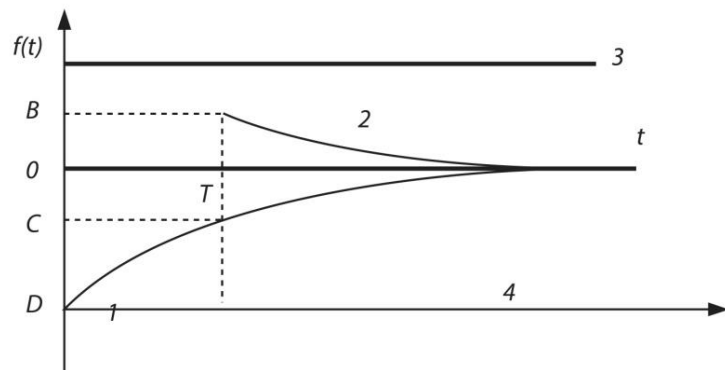


Рисунок 3.8 – Аналіз першого інтервалу складеної функції

$$F_1(p) = \frac{1}{1 - e^{-\alpha_1 T_1}} \left[-\frac{1}{p + \alpha_1} (1 - e^{-(p + \alpha_1) T_1}) + \frac{1}{p} (1 - e^{-p T_1}) \right]. \quad (3.27)$$

Для другого інтервалу за теоремою запізнювання утворюється додаванням чотирьох функцій (1, 2, 3, 4) (рис. 3.9):

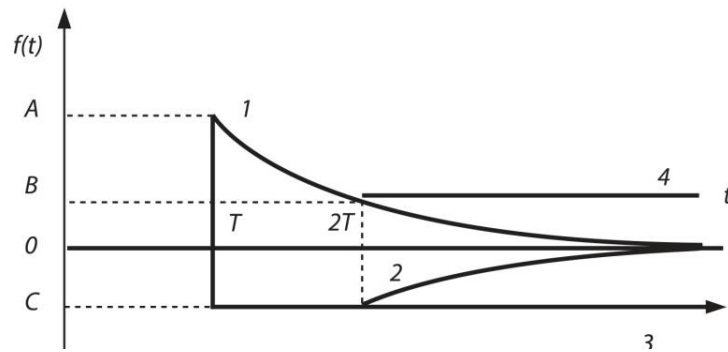


Рисунок 3.9 – Аналіз другого інтервалу складеної функції

$$F_2(p) = \frac{1}{1 - e^{-\alpha_2 T_2}} \left[-\frac{1}{p + \alpha_2} (1 - e^{-(p + \alpha_2) T_2}) \right] + \frac{e^{-\alpha_2 T_2}}{1 - e^{-\alpha_2 T_2}} \frac{1}{p} (e^{-p T_1} - e^{-p T_2}). \quad (3.28)$$

Задана функція матиме вигляд:

$$F(p) = \frac{F_1(p) + F_2(p)}{1 - e^{-p T_n}}. \quad (3.29)$$

Слід зазначити, що амплітуди імпульсів на окремих інтервалах визначаються через табличну залежність або аналітичну функцію модуляції.

Побудуємо зображення сигналу, який має форму, зображену на рис. 3.10 (період послідовності $T_{\Pi} = 3T$).

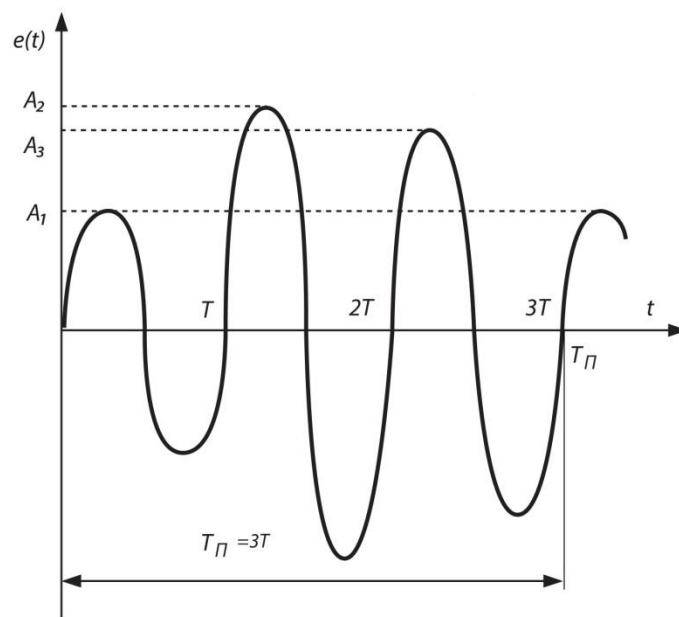


Рисунок 3.10 – Вид модульованого синусоїдального сигналу

Зображення має вигляд

$$F_{II}(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^3 A_i e^{-(i-1)pT} = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-2pT})} (A_1 + A_2 e^{-pT} + A_3 e^{-2pT}). \quad (3.30)$$

Очевидно, що у разі $A_1 = A_2 = A_3 = A$ отримуємо синусоїдальну функцію. Вираз (3.30) також набуває вигляду табличного зображення синусоїдальної функції:

$$\begin{aligned} F_{II}(p) &= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-2pT})} (A_1 + A_2 e^{-pT} + A_3 e^{-2pT}) = \\ &= A \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})(1 + e^{-pT} + e^{-2pT})}{(1 - e^{-3pT})} = \\ &= A \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})(1 + e^{-pT} + e^{-2pT})}{(1 - e^{-pT})(1 + e^{-pT} + e^{-2pT})} = A \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Побудовані зображення в операторній області окремих функцій зведено до табл. 3.4.

Формули № 1 – № 5 із табл. 3.4, де $\omega = 2\pi T$, можна узагальнити для функцій довільного вигляду $F_i(p)$ з таким характером періодизації:

$$F(p) = F_i(p) \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.32)$$

Аналогічні міркування можна застосувати у разі аналізу складених математичних функцій, коли функція апроксимується кількома найпростішими математичними функціями, то результуюча функція формується суперпозицією відповідних елементарних функцій, з введенням пауз у відповідні часові інтервали. Можливе суміщення кількох елементарних функцій, наприклад, у разі побудови зображень сигналу вигляду трапеції використовуються права та ліва пили та ступінчасті імпульси.

Таблиця 3.4 – Зображення в операторній області окремих функцій

№	Назва	Рисунок	Зображення
1	Двополярна синусоїда $f_i = A_i \sin \omega t$; $t \in [0; 2T)$		$F_{\Pi}(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
2	Однополярна синусоїда $f_i = A_i \sin \omega t$; $t \in [0; T)$		$F_{\Pi}(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
3	Правостороння пилоподібна функція $f_i = \frac{A_i}{T} t$; $t \in [0; T)$		$F_{\Pi}(p) = \left(\frac{1}{Tp^2} - \frac{e^{-pT}}{p} - \frac{e^{-pT}}{Tp^2} \right) \times$ $\times \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
4	Лівостороння пилоподібна функція $f_i = -\frac{A_i}{T} t + A_i$; $t \in [0; T)$		$F_{\Pi}(p) = \left(-\frac{1}{Tp^2} + \frac{1}{p} + \frac{e^{-pT}}{Tp^2} \right) \times$ $\times \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
5	Двостороння симетрична пилоподібна функція $f_i = \frac{A_i}{T} t$; $t \in [0; T/2)$ $f_i = -\frac{A_i}{T} t + 2A_i$; $t \in [T/2; T)$		$F_{\Pi}(p) = \frac{2}{Tp^2} (1 - 2e^{-pT} + e^{-2pT}) \times$ $\times \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$

3.3. Побудова зображень і оригіналів струмів для складних функцій генератора на базі синусоїдальної функції

Для побудови зображень і оригіналів струмів для складних функцій генератора на базі синусоїдальної функції виділимо такі типи складних періодичних синусоїдальних функцій [40, 41]:

1) однополярна синусоїда з декількома інтервалами (півперіодами синусоїди) на періоді різної амплітуди; класична двополярна синусоїда отримується як частковий випадок однополярної синусоїди з двома періодами протилежної амплітуди;

2) випадок відсікання переднього фронту однополярної синусоїди, що дає змогу розраховувати випадки керування перетворювачами за допомогою зміни тривалості дії синусоїдального генератора і відповідної модуляції; як частковий випадок за нульового відсічення переднього фронту отримуємо звичайну однополярну синусоїду;

3) випадок відсікання заднього фронту однополярної синусоїди, що дає змогу розрахувати випадки примусової комутації окремих видів перетворювачів та відповідної модуляції; як частковий випадок за нульового відсікання заднього фронту отримуємо звичайну однополярну синусоїду;

4) випадок відсікання переднього та заднього фронту однополярної синусоїди, що дає змогу узагальнити всі попередні випадки.

Складна періодична функція типу 2 описується такими параметрами:

– частота ω_i ;

– амплітуда (тут мається на увазі амплітуда синусоїди, від якої утворена функція, що не обов'язково збігається з амплітудою узагальненої синусоподібної функції) U_i ;

– значення відсікання переднього фронту $\alpha_i = \omega_i \Delta t_i$ (тут Δt_i – відсікання переднього фронту у одиницях часу, якщо не наведено у радіанах).

Розглянемо побудову зображень функцій генератора та навантаження за допомогою перетворень Лапласа та зображень функцій струмів для перелічених функцій.

1) Однополярна синусоїда.

Знайдемо зображення функції, період якої складається з трьох напівперіодів синусоїд з різними амплітудами однакової тривалості (рис. 3.11):

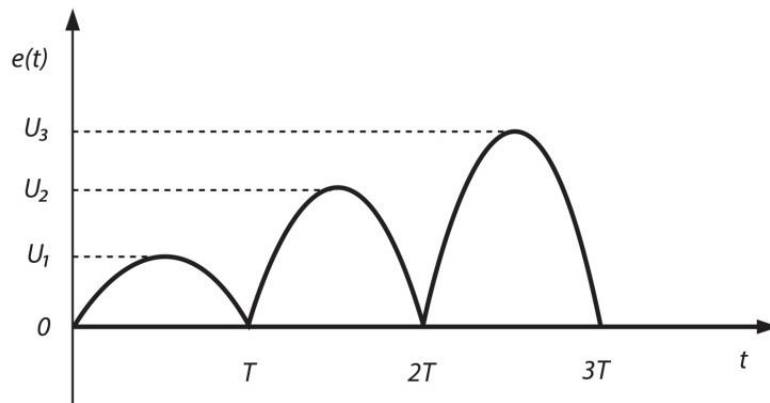


Рисунок 3.11 – Вигляд функції з синусоїдальних імпульсів

Цю функцію можна отримати шляхом періодичного повторення трьох півперіодів синусоїд заданих амплітуд однакової частоти (тут інтервал дії кожної функції дорівнює половині періоду синусоїди). Кожен з яких у свою чергу, за теоремою запізнювання, утворюється сумою двох синусоїдальних функцій (див. рис. 3.12: функція $\sin(\omega t)$ показана суцільною лінією; функція $-\sin(\omega(t+T))$ показана пунктирною лінією):

$$F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} (1 + e^{-pT}). \quad (3.33)$$

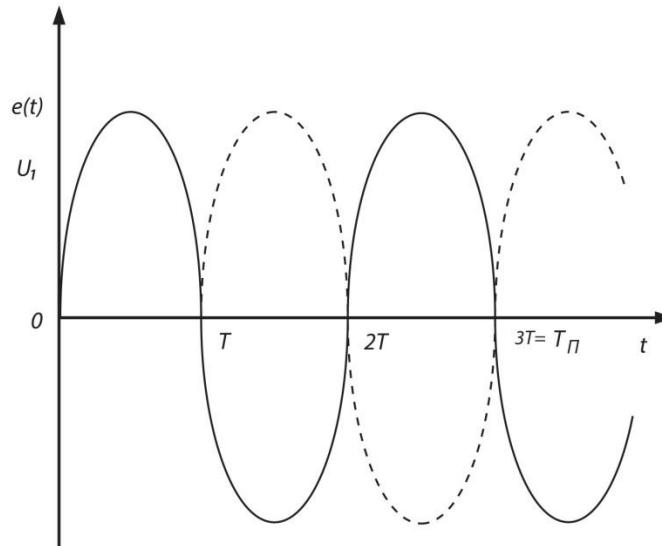


Рисунок 3.12 – Побудова імпульсної синусоїдальної функції

Аналогічно до табл. 3.2 запишемо $F_1(p), F_2(p), F_3(p)$, виходячи з формули (3.33):

$$F_1(p) = U_1 \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} (1 + e^{-pT}); \quad (3.34)$$

$$F_2(p) = U_2 \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} (e^{-pT} + e^{-2pT}) = U_2 \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} e^{-pT} (1 + e^{-pT}); \quad (3.35)$$

$$F_3(p) = U_3 \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} (e^{-2pT} - e^{-3pT}) = U_3 \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} e^{-2pT} (1 - e^{-pT}). \quad (3.36)$$

Тоді вираз (3.7) для заданої функції запишеться:

$$F_i(p) = F_1(p) + F_2(p) + F_3(p) = \sum_{i=1}^3 F_i(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} (1 + e^{-pT}) \sum_{i=1}^3 U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.37)$$

Формулу (3.37) можна узагальнити для випадків n синусоїдальних імпульсів у періоді:

$$F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_i})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.38)$$

2) Однополярна синусоїда з відсіканням переднього фронту.

Знайдемо зображення функції, період якої складається з трьох півперіодів синусоїд з відсіченням переднього фронту з різними амплітудами однакової тривалості (рис. 3.13):

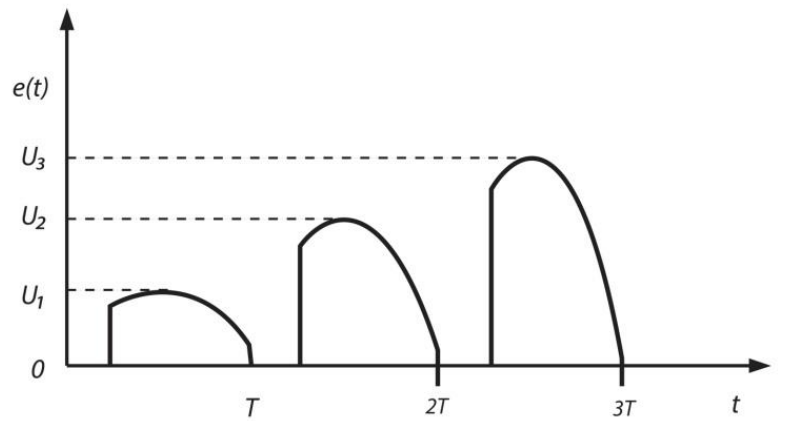


Рисунок 3.13 – Вигляд імпульсної синусоїдальної функції з відсіканням переднього фронту

Таку функцію можна отримати шляхом періодичного повторення трьох півперіодів синусоїд з відсіканням переднього фронту заданих амплітуд однакової частоти, кожен з яких, у свою чергу, за теоремою запізнювання, утворюється сумою двох синусоїдальних функцій (див. рис. 3.14: функція $\sin(\omega(t + t_1))$, зсунута на час t_1 у додатному напрямку осі часу, показана суцільною лінією; функція $-\sin(\omega(t + T))$ – пунктирною):

$$F(p) = \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha)e^{-pt_1} + \omega e^{-pT}}{p^2 + \omega^2}. \quad (3.39)$$

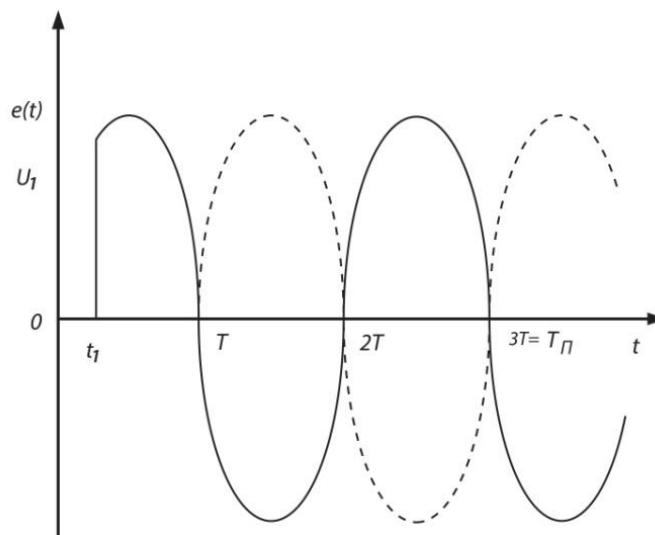


Рисунок 3.14 – Побудова імпульсної синусоїдальної функції з відсіканням переднього фронту

Аналогічно до формули (3.39):

$$F(p) = \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{-p t_1} + \omega e^{-p T}}{(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-p T_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.40)$$

3) Однополярна синусоїда з відсіканням заднього фронту

Знайдемо зображення функції, період якої складається з трьох півперіодів синусоїд з відсіканням переднього фронту з різними амплітудами однакової тривалості (рис. 3.15):

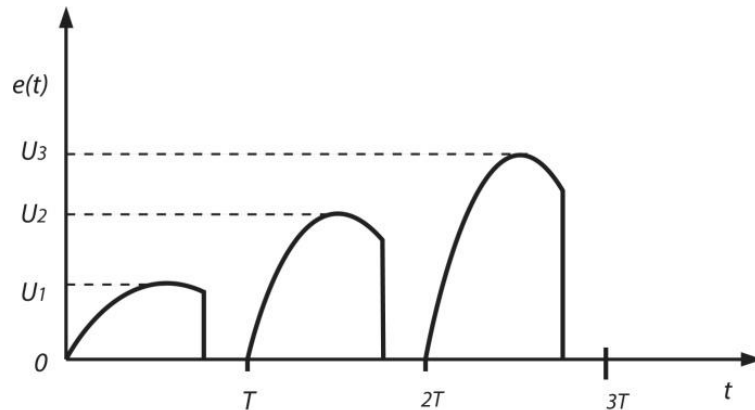


Рисунок 3.15 – Вигляд імпульсної синусоїдальної функції з відсіканням заднього фронту

Цю функцію можна отримати шляхом періодичного повторення трьох напівперіодів синусоїд з відсіканням переднього фронту заданих амплітуд однакової частоти, кожен з яких, у свою чергу, за теоремою запізнювання, утворюється сумою двох синусоїдальних функцій (див. рис. 3.16: функція $\sin(\omega t)$ показана суцільною лінією; функція $-\sin(\omega t + \gamma)$; $\gamma = \omega t_2$ – пунктирною лінією):

$$F(p) = \frac{-(p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma t_2} + \omega}{(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-p T_n})}. \quad (3.41)$$

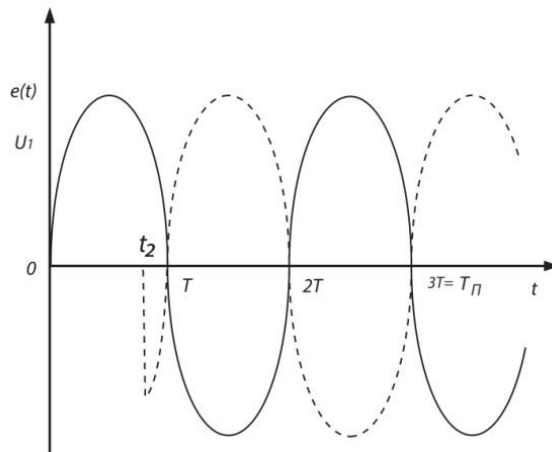


Рисунок 3.16 – Побудова імпульсної синусоїдальної функції з відсіканням заднього фронту

Аналогічно до формули (3.41):

$$F(p) = \frac{-(p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma t_2} + \omega}{(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.42)$$

4) Однополярна синусоїда з відсіканням переднього та заднього фронту.

Знайдемо зображення функції, період якої складається з трьох напівперіодів синусоїд з відсіканням переднього фронту з різними амплітудами однакової тривалості (рис. 3.17):

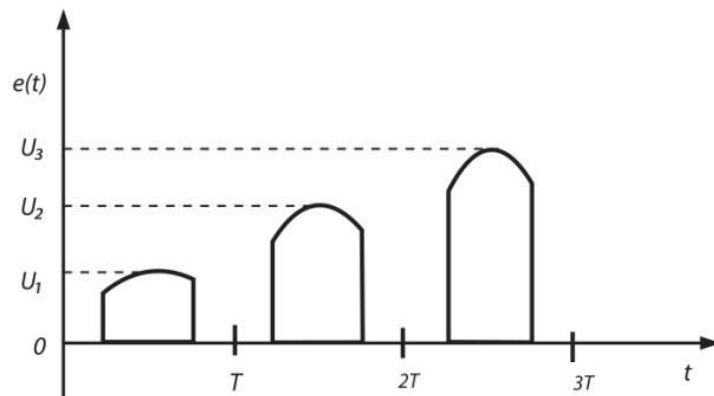


Рисунок 3.17 – Вигляд імпульсної синусоїдальної функції з відсічення переднього та заднього фронтів

Цю функцію можна отримати шляхом періодичного повторення трьох півперіодів синусоїдальної функції з відсіканням переднього фронту заданих амплітуд однакової частоти, кожен з яких, у свою чергу, за теоремою запізнювання, утворюється сумою двох синусоїдальних функцій (див. рис. 3.18: функція $\sin(\omega t)$ показана суцільною лінією; функція $-\sin(\omega(t+T))$ – пунктирною

лінією):

$$F(p) = U \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma_1} - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma_2}}{(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-pT_n})}. \quad (3.43)$$

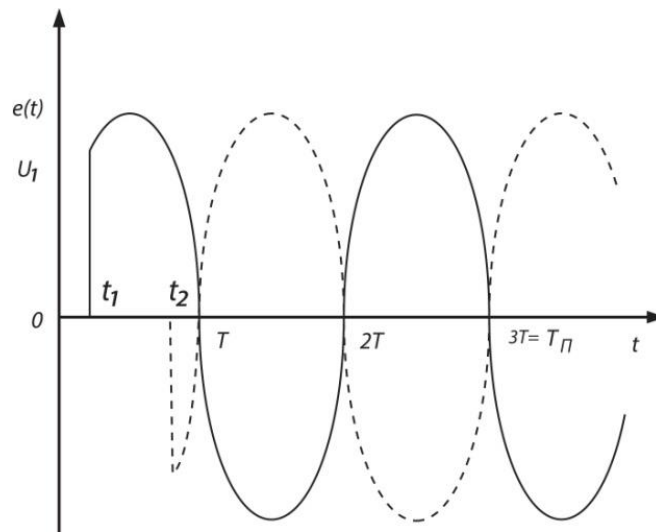


Рисунок 3.18 – Побудова імпульсної синусоїдальної функції з відсіканням переднього та заднього фронтів

Аналогічно до формули (3.43) можемо записати:

$$F(p) = \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma_1} - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma_2}}{(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (3.44)$$

У подальшому основою для узагальнених формул стане четвертий вид функції типу 4 – синусоїда з відсіканням переднього і заднього фронтів; усі попередні випадки є її частковими випадками, у чому легко пересвідчитися з наведених побудов зображень.

На основі отриманих виразів зображень струмів навантаження для наведених вище видів складних періодичних функцій типу 2 знайдемо оригінали струмів навантаження за допомогою оберненого перетворення Лапласа.

1) Однополярна синусоїда.

Розглянемо випадок, коли період з одного інтервалу T ($n=1$), $U_1 = U$, $R_1 = R$, $Z(p) = R + pL$. Тоді зображення струму запишеться:

$$I_1(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = U \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT})(R + pL)}. \quad (3.45)$$

Відповідно до (3.15) оригінал струму навантаження на інтервалі

знаходиться як різниця перехідного струму $i_{p,i}(t)$ (що є результатом роботи генератора на інтервалі, який розраховується) та вільного струму $i_{v,i}(t)$ (що є результатом роботи генераторів на всіх інших інтервалах, крім того, який розраховується) $i_{v,i}(t)$ струмів.

Визначимо перехідний струм $i_{p,1}(t)$. За визначення перехідного струму рахуються складові функції генератора, що діють лише на інтервалі, який розраховується. За розрахунку лишків використовуються всі корені знаменника як корені, що визначаються навантаженням, так і корені, що визначаються генератором. Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} i_{p,1}(t) &= R\hat{a}s \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} + R\hat{a}s \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_2 = j\omega} + \\ &+ R\hat{a}s \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_3 = -j\omega} = \\ &= \frac{U \sin \psi}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\sigma t} + \frac{U \sin(\omega t - \psi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega t - \psi) + \sin(\psi) e^{-\sigma t}]. \quad (3.46) \end{aligned}$$

Визначимо вільний струм $i_{v,1}(t)$. За розрахунку лишків використовуються лише корені, що визначаються навантаженням. Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} i_{v,1}(t) &= Res U \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})(R + pL)} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= - \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{(\sin \psi)(1 + e^{-\sigma T})}{(1 - e^{-\sigma T_n})} e^{-\sigma t} \quad (3.47) \end{aligned}$$

2) Однополярна синусоїда з відсіченням переднього фронту.

Аналогічно до попереднього варіанту розглянемо випадок, коли період роботи системи складається з двох інтервалів ($n=2$), $U_1 = U$, $U_2 = 2U$, $R_1 = R$, $R_2 = R$, $Z(p) = R + pL$. Тоді зображення струму навантаження запишеться:

$$I(p) = U \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{-pT_1} + \omega e^{-pT}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})}. \quad (3.48)$$

Оригінал струму навантаження на інтервалі знаходиться за формулою

(3.15).

Розрахуємо струми першого інтервалу, для якого $t \in [0, t_1]$.

Перехідний струм $i_{p,1}(t) = 0$, оскільки на першому інтервалі відсутня дія генератора напруги. Визначимо вільний струм $i_{v,1}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{v,1}(t) &= R\dot{a}sU \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha)e^{-pt_1} + \omega e^{-pT}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_i})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{(\sin(\alpha - \psi)e^{-\sigma(T-t_1)} - \sin \psi)}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Розрахуємо струми другого інтервалу, для якого $t \in [t_1, T]$.

Визначимо перехідний струм $i_{p,2}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{p,2}(t) &= R\dot{a}s \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} + R\dot{a}s \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_2 = j\omega} + \\ &+ R\dot{a}s \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_3 = -j\omega} = \\ &= \frac{U(\sin(\psi - \alpha))}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\sigma t} + \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{(\sin(\alpha - \psi)e^{-\sigma T} - \sin \psi e^{-\sigma t_1})}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Визначимо вільний струм $i_{v,2}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{\dot{a}\ddot{e},2}(t) &= R\dot{a}sU \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha)e^{-pT} + \omega e^{-p(T-t_1)}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_i})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{(\sin(\alpha - \psi)e^{-\sigma T} - \sin \psi e^{-\sigma t_1})}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.51)$$

3) Однополярна синусоїда з відсіченням заднього фронту.

Аналогічно до попереднього варіанту розглянемо випадок, коли період роботи системи складається з двох інтервалів ($n = 2$), $U_1 = U$, $U_2 = 2U$, $R_1 = R$, $R_2 = R$, $Z(p) = R + pL$. Тоді зображення струму навантаження запишеться:

$$I(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = \frac{-(p \sin \gamma + \omega \cos \gamma)e^{\sigma_2} + \omega}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})}. \quad (3.52)$$

Оригінал струму навантаження на інтервалі знаходиться за формулою (3.15).

Розрахуємо струми першого інтервалу, для якого $t \in [0, t_2)$.

Визначимо перехідний струм $i_{p,1}(t)$. Розрахунок аналогічний випадку однополярної синусоїди:

$$\begin{aligned} i_{p,1}(t) &= \text{Res} \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} + \text{Res} \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_2 = j\omega} + \\ &+ \text{Res} \frac{U}{L} \frac{\omega}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_3 = -j\omega} = \\ &= \frac{U \sin \psi}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\sigma t} + \frac{U \sin(\omega t - \psi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega t - \psi) + \sin(\psi) e^{-\sigma t}]. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Визначимо вільний струм $i_{v,1}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{v,1}(t) &= \text{Res} U \frac{-(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma t_2} + \omega}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\sin(-\psi) e^{-\sigma T} - \sin(\gamma - \psi) e^{-\sigma(T-t_2)}}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.54)$$

Розрахуємо струми другого інтервалу, для якого $t \in [t_2, T)$.

Перехідний струм $i_{p,2}(t) = 0$, оскільки на другому інтервалі відсутня дія генератора напруги.

Визначимо вільний струм $i_{v,2}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{v,2}(t) &= \text{Res} U \frac{-(p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{-pT} + \omega e^{-p(T-t_2)}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\sin(-\psi) e^{-\sigma t_2} - \sin(\gamma - \psi)}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.55)$$

4) Однополярна синусоїда з відсіченням переднього та заднього фронту.

Розглянемо випадок, коли період роботи системи складається з трьох інтервалів ($n=3$), $U_1 = 0$, $U_2 = U$, $U_3 = 0$, $R_1 = R$, $R_2 = R$, $R_3 = R$ $Z(p) = R + pL$. Тоді зображення струму навантаження запишеться:

$$I_1(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = U \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma t_1} - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma t_2}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})}. \quad (3.56)$$

Оригінал струму навантаження на інтервалі знаходиться за формулою

(3.15).

Розрахуємо струми першого інтервалу, для якого $t \in [0, t_1]$.

Перехідний струм $i_{p,1}(t) = 0$, оскільки на першому інтервалі відсутня дія генератора напруги.

Визначимо вільний струм $i_{v,1}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{v,1}(t) &= \text{Rees} \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma t_1} - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma t_2}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\sin(\alpha - \psi) e^{-\sigma(T-t_1)} - \sin(\gamma - \psi) e^{-\sigma(T-t_2)}}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Розрахуємо струми другого інтервалу, для якого $t \in [t_1, t_2]$.

Визначимо перехідний струм $i_{p,2}(t)$. Розрахунок аналогічний випадку однополярної синусоїди з відсіченням переднього фронту:

$$\begin{aligned} i_{p,2}(t) &= \text{Res} \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} + \text{Res} \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_2 = j\omega} + \\ &+ \text{Res} \frac{U}{L} \frac{p \sin \alpha + \omega \cos \alpha}{(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)} e^{pt} \Big|_{p_3 = -j\omega} = \\ &= \frac{U(\sin(\psi - \alpha))}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\sigma t} + \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{(\sin(\alpha - \psi) e^{-\sigma T} - \sin \psi e^{-\sigma t_1})}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Визначимо вільний струм $i_{v,2}(t)$:

$$\begin{aligned} i_{v,2}(t) &= \text{Res} U \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma(t_2 - t_1)}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\sin(\alpha - \psi) e^{-\sigma T} - \sin(\gamma - \psi) e^{-\sigma(T - (t_2 - t_1))}}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \end{aligned} \quad (3.59)$$

Розрахуємо струми третього інтервалу, для якого $t \in [t_2, T]$.

Перехідний струм $i_{p,3}(t) = 0$, оскільки на третьому інтервалі відсутня дія генератора напруги.

Визначимо вільний струм $i_{v,3}(t)$:

$$i_{v,1}(t) = \text{Res} U \frac{(p \sin \alpha + \omega \cos \alpha) e^{\sigma(T - (t_2 - t_1))} - (p \sin \gamma + \omega \cos \gamma) e^{\sigma T}}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)(1 - e^{-pT_n})} e^{pt} \Big|_{p_1 = -\sigma} =$$

$$= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\sin(\alpha - \psi)e^{-\sigma(t_2 - t_1)} - \sin(\gamma - \psi)}{(1 - e^{-\sigma T})} e^{-\sigma t}. \quad (3.60)$$

За аналогією до випадку складної періодичної функції типу 1, запишемо узагальнені формули для побудови алгоритму розрахунків у випадку змінних відсічень переднього та заднього фронтів, опору навантаження, амплітуди синусоїдальної функції. У цьому разі будемо вважати, що на кожному інтервалі є дія певної функції генератора з відсіченням переднього та заднього фронтів у загальному випадку, вигляд такої функції наведено на рис. 3.19.

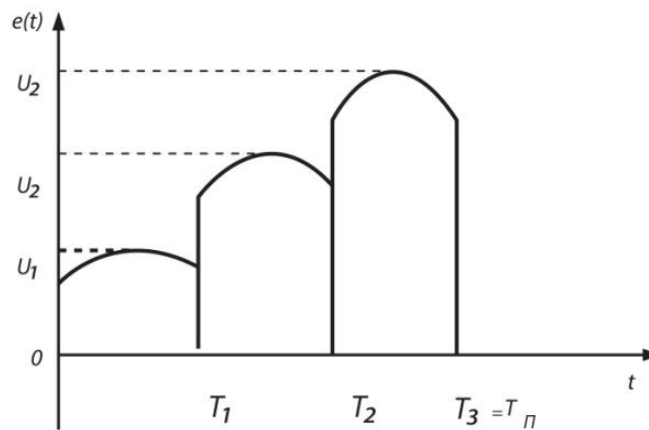


Рисунок 3.19 – Вигляд імпульсної синусоїдальної функції з відсічення переднього та заднього фронтів без проміжків між імпульсами

Вираз перехідного струму навантаження для будь-якого інтервалу має такий вигляд:

$$i_{P,i}(t) = I_i \cdot [\sin(\omega_i \cdot t + \alpha_i - \psi_i) - \sin(\alpha_i - \psi_i) \cdot e^{-\sigma_i t}], \quad (3.61)$$

тут і далі $I_i = U_i / R_i$.

Розрахунок вільних струмів на інтервалах здійснюється за формулою (3.62), що отримується з міркувань, аналогічних міркуванням у разі отримання відповідної формули для кусково-прямокутної функції:

$$i_{V,i}(t) = -\frac{e^{-\alpha_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \alpha_k \tau_k}} \cdot [I_{i-1+n} (\sin(\alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n}) e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - \sin(\omega_{i-1+n} \cdot \tau_{i-1+n} + \alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n})) +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=2}^n \left(I_{i-j+n} (\sin(\alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^j (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})} - \right. \\
& \left. - \sin(\omega_{i-j+n} \cdot \tau_{i-j+n} + \alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})} \right) \Bigg] . \quad (3.62)
\end{aligned}$$

Розрахунок струмів на інтервалах між комутаціями здійснюється за формулою (3.15). У випадку, якщо функція генератора на цьому i -му інтервалі не діє, тобто має місце нульова пауза, розрахунок перехідного струму здійснюємо за формулою (3.61), але вважаючи амплітуду струму I_i відповідного інтервалу такою, що дорівнює нулю. Це дає змогу узагальнити наведені вище випадки складних періодичних функцій, що походять від синусоїди, та сформулювати узагальнені формули розрахунку вільних і перехідних струмів на інтервалах роботи системи.

Розглянемо побудову зображень функцій генератора та навантаження за допомогою перетворення Лапласа та зображень функцій струмів для типів 3, а та 3, б складних періодичних функцій на таких прикладах.

У Додатку Г розглянуто формування зображення напруги сигналу генератора складної форми на основі синусоїдальної функції (рис. 3.20). Інтервал роботи схеми T включає в себе два інтервали дії завад, кожен з яких також складається з двох інтервалів – інтервалу дії генератора завад та інтервалу паузи. Тут і далі будемо вважати, що ці інтервали мають однакову тривалість, тоді $T = 4T_{imp}$. Також у цьому додатку наведено розрахунок аналітичного виразу для струму схеми з RL -навантаженням та синусоїдальною формою сигналу генератора з періодом синусоїдального стигналу T та періодом роботи схеми $T/2$, рис. 3.21.

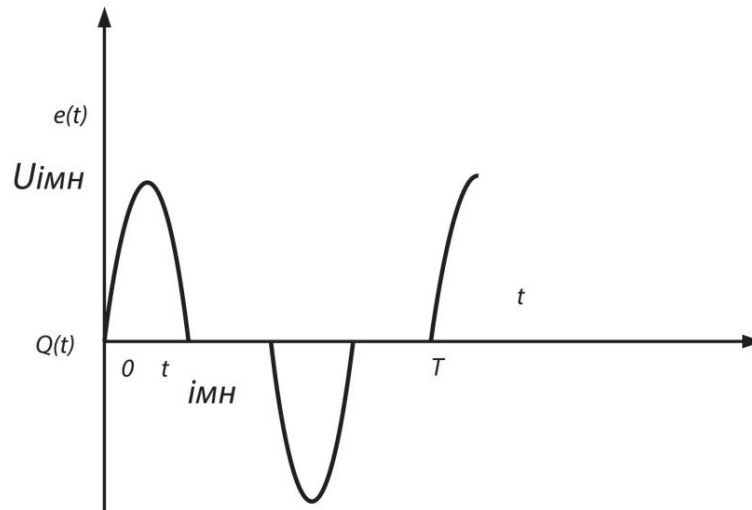


Рисунок 3.20 – Вигляд імпульсної синусоїдальної функції

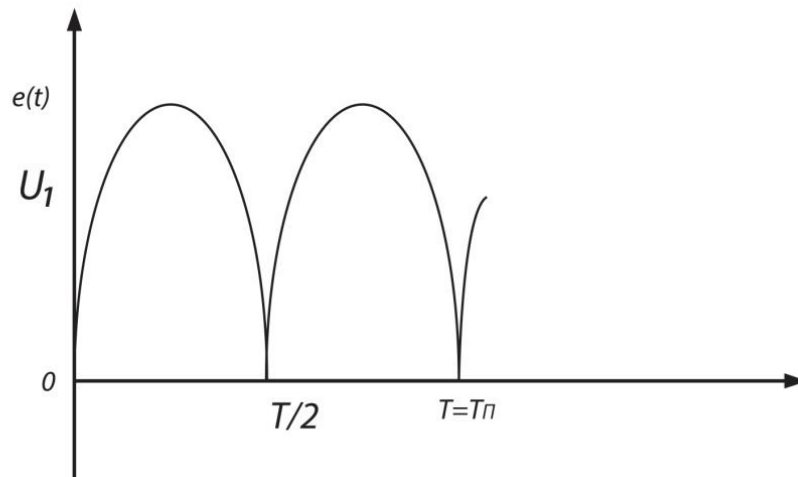


Рисунок 3.21 – Вигляд функції генератора

Узагальнений алгоритм розрахунку струмів у циклічних схемах з RL -навантаженням наведено в Додатку Д.

3.4. Особливості побудови зображень функцій напруг і струмів для модульованих функцій

Розглянемо різні випадки імпульсної модуляції: амплітудно-імпульсну модуляцію (АІМ), частотно-імпульсну модуляцію (ЧІМ), широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) та фазово-імпульсну модуляцію (ФІМ) [29, 40]. Слід зазначити, що вирази зображень модульованих функцій наведено для випадків, коли процеси повторюються з періодом T_n , у разі, якщо вони не повторюються, наведені вирази слід не помножувати на $F(p) = 1/(1 - e^{-pT_n})$.

У разі введення модуляції $f_M(\Pi_M, T_\Pi, t)$, де Π_M – параметр модуляції, функція сигналу запишеться так:

$$F_\Pi(p) = \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n \left\{ F_i(f_M(\Pi_M, T_\Pi, t), \sum_{j=1}^m f_{ej}, p) \right\}. \quad (3.63)$$

Розглянемо особливості побудови функцій з різними видами модуляції [10, 71]. Найпростішим випадком є амплітудна модуляція [10], амплітуда ступінчастого імпульсу не змінюється впродовж інтервалу. На рис. 3.22 розглянуто випадок $T_\Pi = 7T$.

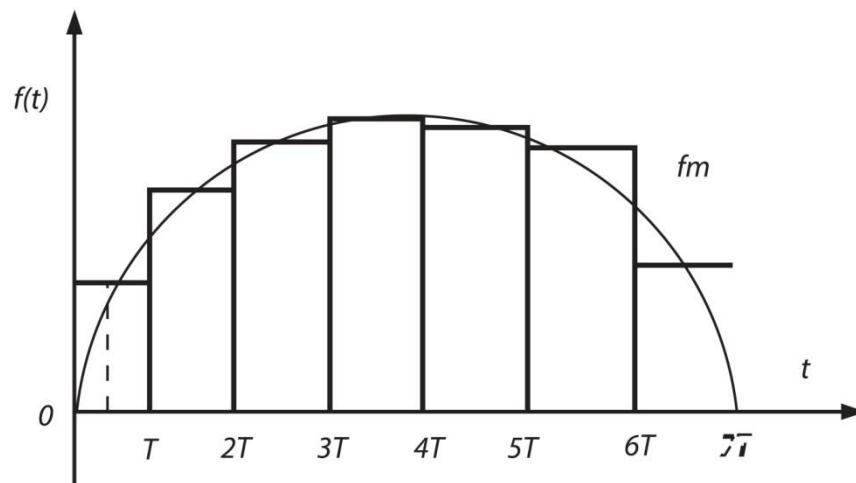


Рис. 3.22 – Амплітудна модуляція півперіоду синусоїдальної функції у разі $T_\Pi = 7T$

За модуляції функції з прямокутних імпульсів певною функцією модуляції f_M вираз має такий вигляд:

$$F(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n f_m((i - 0,5)T) e^{-2(i-1)pT}. \quad (3.64)$$

Формули зображення для випадків АІМ, ШІМ, ЧІМ та ФІМ наведені в табл. 3.5.

Побудуємо зображення для функції $f(t)$, зображеної на рис. 3.23, для модуляції амплітуд півперіодів синусоїди.

Таблиця 3.5 – Зображення модульованих функцій

№	Назва	Параметр модуляції	Рисунок	Формула зображення
1	АІМ	A_i – амплітуда імпульсів		$F(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n f_m((i - 0,5)T) e^{-2(i-1)pT}$
2	ШІМ	T_i/T – співвідношення тривалостей імпульсу та паузи за постійний проміжок часу		$F(p) = A \frac{1}{p(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n (1 - e^{-pT_i}) e^{-(i-1)pT}$ <p>де T_i – тривалість імпульсу на i-му інтервалі.</p>
3	ЧІМ	T_i/T – тривалість паузи між імпульсами		$F(p) = A \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n e^{-pT_{i-1}}$ <p>де T_{i-1} – пауза між $i-1$-м та i-м імпульсами</p>
4	ФІМ	T_i – час початку імпульсу всередині певних постійних за тривалістю інтервалів часу		$F(p) = A \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times$ $\times \sum_{i=1}^n (e^{T_{en} - T - T_{i-1}} + e^{-pT_i})$ <p>де $T_{en} = const$ – сумарний час імпульсу та паузи, $T_0 = 0$</p>

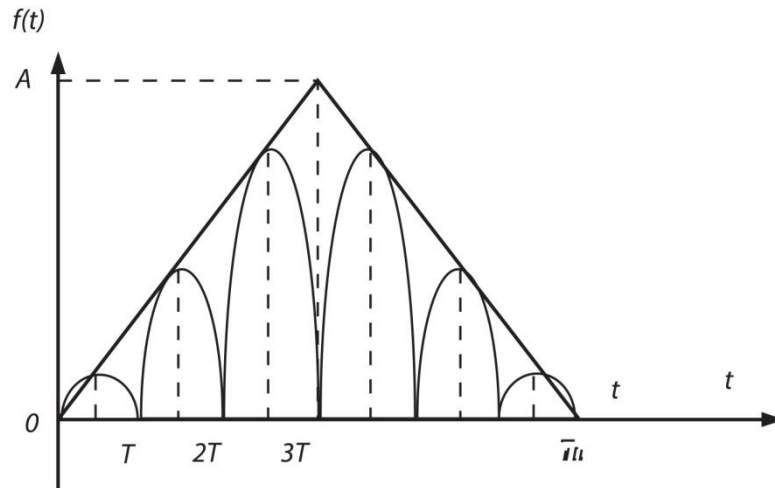


Рис. 3.23 – Модуляція півхвилі синусоїдального сигналу з використанням як функції модуляції функції рівнобедреного трикутника

Функція модуляції $f_M(t)$ має вигляд рівнобедреного трикутника висотою A . Розглянемо перший півперіод $t \in [0; T_H / 2)$, $T_H = 6T$, коли функція модуляції наростає і має вигляд: $f_{M1}(t) = \frac{A}{6T}t$. Тоді зображення:

$$F(p) = \frac{A}{6T} \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})} \sum_{i=1}^3 (i - 0,5) T e^{-(i-1)pT}, \quad (3.65)$$

а для інтервалу $t \in [T_H / 2, T_H)$, коли функція модуляції $f_{M2}(t) = A - \frac{A}{6T}t$ спадає, має вигляд:

$$F(p) = \frac{A}{6T} \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})} \sum_{i=4}^6 (6T - (i - 0,5)T) e^{-(i-1)pT}, \quad (3.66)$$

Двополярний сигнал отримується шляхом додавання відповідного виразу для визначення функції у нижній напівплощині. Розглянемо цей випадок на прикладі модуляції функції, яка показана на рис. 3.24.

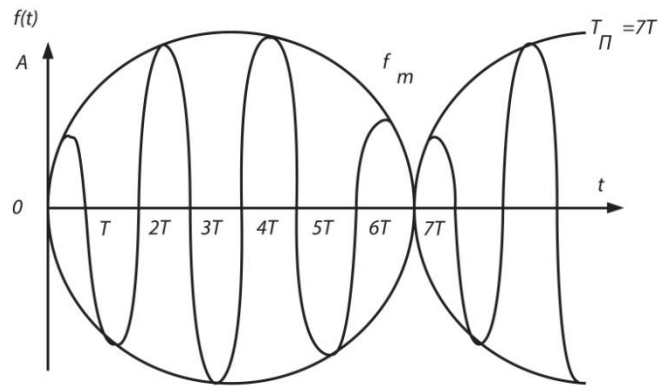


Рис. 3.24 – Модуляція синусоїдального сигналу з використанням як функції модуляції функції синусоїдального сигналу

$$F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})} \sum_{i=1}^{2n-1} (i - 0,5) T e^{-(i-1)pT} - \left[\frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})} \sum_{i=1}^{2n} (i - 0,5) T e^{-(i-1)pT} \right], \quad (3.67)$$

де $T_{\Pi} = 2nT$.

Як приклад побудуємо зображення для функції $f(t)$ ШІМ-модуляції ступінчастих імпульсів, тривалість яких змінюється за синусоїдою, півперіод якої дорівнює періоду функції сигналу, період сигналу включає 20 однакових часових інтервалів T . Зображення згідно з формулою № 2, наведеною в табл. 3.5, має такий вигляд:

$$F(p) = A \frac{1}{p(1 - e^{-20pT})} \sum_{i=2}^{20} (1 - e^{-pT \sin\left[\frac{\pi}{20}(i-1)\right]}) e^{-(i-1)pT}; \quad (3.68)$$

Тут підрахунок ведеться з другого інтервалу, оскільки тривалість імпульсу на першому інтервалі відповідно до формули № 2 для ШІМ-модуляції з табл. 3.2 для синусоїдальної функції модуляції дорівнює нулю.

З врахуванням узагальнених формул для розрахунків ЕТК-Smart із змінюваними параметрами та RL -навантаженням для складних періодичних функцій типів 1 – 4 послідовність дій для здійснення їх аналізу така:

1) побудова графіків або таблиць залежностей циклічних змін параметрів електричного кола від часу, у однаковому масштабі, визначення

функцій генератора $U_{\Gamma}(t)$ та навантаження $Z(t)$;

2) побудова зображень функцій генератора $U(p)$ та навантаження $Z(p)$ за допомогою перетворень Лапласа: $U(p) = L\{U_{\Gamma}(t)\}$, $Z(p) = L\{Z(t)\}$;

3) побудова зображень функцій струмів відповідно до закону Ома в операторній формі: $I(p) = U(p) / Z(p)$;

4) знаходження оригіналів струмів за допомогою оберненого перетворення Лапласа $i(t) = L^{-1}\{I(p)\}$.

Побудова графіків здійснюється у одному масштабі за віссю часу у стандартизованих одиницях виміру. Початок періодів обох функцій, залежностей напруги генератора та параметрів навантаження (розглядається випадок зміни активної складової), починається у початку координат; зміщення графіків математичних залежностей одне відносно одного не допускається. У разі фактичного взаємного зміщення графіків залежностей або у випадках, коли фактично графіки починаються не у початку координат, графіки залежностей необхідно привести до наведених вище вимог.

Побудова таблиць здійснюється у одних одиницях виміру з дотриманням усіх вимог, перелічених для графіків.

Таблиці дають змогу організувати алгоритм розрахунку струмів у колі, тоді як графіки є їхнім наочним представленням. Докладно побудову вхідних таблиць даних буде розглянуто у розділі 4, за побудови алгоритму розрахунку струмів.

Детально розглянемо побудову складних періодичних функцій, для яких базовими є функції 1 – 4 типів згідно з табл. 4.1. Узагальнені формули отримаємо у результаті аналізу відповідних співвідношень.

Висновки до розділу 3

1. Отримано аналітичні вирази зображень та оригіналів напруг і струмів у електричних комплексах електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами шляхом визначення відповідних співвідношень для базових функцій рівня, синусоїди, експоненти та прямої пропорційності, що дає змогу здійснювати розрахунки відповідних електромагнітних процесів у аналітичній формі.

2. Проаналізовано особливості аналітичних розрахунків у електричних комплексах з модульованими параметрами напруг генераторів шляхом побудови зображень та оригіналів напруг і струмів, що дає змогу здійснювати аналіз відповідних електричних кіл, у тому числі з циклічно змінюваними параметрами навантажень.

3. Сформульовано алгоритм розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами шляхом узагальнення отриманих аналітичних виразів і відповідних розрахунків електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати автоматизацію відповідних розрахунків за допомогою обчислювальної техніки.

4. Здійснено розширення сфери використання методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень за рахунок отримання нових функціональних залежностей для складних та модульованих функцій, які описують електромагнітні процеси в операторній області Лапласа, що дало змогу отримати аналітичні вирази для моделювання та аналізу періодичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, а також аналізу завад та інтегральних характеристик таких систем.

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЗАВАД У СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

4.1. Розвиток можливостей методу окремих складових для моделювання усталених режимів у ЕТК-Smart

Особливості аналізу системи у разі нелінійних елементів

У разі аналізу систем, які містять нелінійні елементи, необхідно передбачати етап лінеаризації нелінійностей та визначення моментів часу t_i , коли необхідно здійснити перехід від апроксимації нелінійного елемента i -ю лінійною залежністю до апроксимації $(i+1)$ -ю лінійною залежністю.

Для визначення моментів часу t_i в загальному випадку потрібно задіяти ітераційну процедуру розрахунку з послідовним уточненням таких моментів часу.

Також зазначимо, що за рахунок лінеаризації нелінійних елементів кількість інтервалів сталості структури, на яких параметри елементів системи є незмінними, зростає. Проте методологія розрахунку електромагнітних процесів, розглянута у попередніх підрозділах дисертаційного дослідження, залишиться без змін.

Врахування у разі аналізу внутрішнього опору генератора R_G та ліній передачі R_L .

Алгоритм врахування у разі аналізу внутрішнього опору генератора R_G та ліній передачі R_L :

- 1) $R_{ВН} = R_G + R_L = 0$; $E_{ЕКВ}^{(1)}(t) = E(t)$;
- 2) Перший крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму $i_H^{(1)}(t)$ у виділеному контрольованому перетині;
- 3) Визначення параметрів еквівалентного генератора $E_{ЕКВ}^{(2)}(t) = E_{ЕКВ}^{(1)}(t) - R_{ВН} \cdot i_H^{(1)}(t)$;
- 4) Другий крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму $i_H^{(2)}(t)$ у виділеному контрольованому перетині;
- 5) Визначення параметрів еквівалентного генератора $E_{ЕКВ}^{(3)}(t) = E_{ЕКВ}^{(2)}(t) -$

$$R_{BH} \cdot i_H^{(2)}(t);$$

б) За результатами оцінки норми $\| E_{EKB}^{(3)}(t) - E_{EKB}^{(2)}(t) \| \leq \varepsilon_E$, ε_E – точність апроксимації, визначається умова доцільності переходу на наступний крок ітераційного процесу.

Для інженерних розрахунків часто буває достатньо одного чи двох кроків ітераційних процесів аналізу.

Аналіз процесів у разі стрибкоподібної зміни параметрів реактивних елементів (індуктивності L та ємності C).

У разі стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності L та ємності C у сформованій моделі системи, що розглядається, необхідно врахувати умови некоректної комутації в моменти t_i зміни параметрів реактивних елементів. Згідно з умовами некоректної комутації для реактивних елементів у моменти часу $(t_i - 0)$ та $(t_i + 0)$ має виконуватися принцип безперервності потокозчеплення, тобто $i(t_i - 0)L_{i-1} = i(t_i + 0)L_i$.

Надалі розглянемо випадок стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності L на двох інтервалах часу на період $[0, T]$. Наведений підхід надалі може бути поширеним на схеми моделювання за збільшення інтервалів стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності L та ємності C .

Покладемо, що для 1-го та 2-го інтервалі часу (відповідно $[0, t_1]$ та $[t_1, T]$) величина індуктивності складає відповідно L_1 та L_2 .

Для моментів часу t_1 та T запишемо безперервності потокозчеплення для індуктивності L :

$$i(t_1 - 0)L_1 = i(t_1 + 0)L_2; \quad i(T - 0)L_2 = i(T + 0)L_1.$$

Виконання принципу безперервності потокозчеплення в моменти зміни параметрів індуктивності призведе до стрибкоподібної зміни значень струму в моменти $(t_1 + 0)$ та $(T + 0)$ у порівнянні відповідно з моментами часу $(t_1 - 0)$ та $(T - 0)$:

$$i(t_1 + 0)L = i(t_1 - 0)L_1; \quad i(T + 0)L_1 = i(T - 0)L_2.$$

Розрахунок електромагнітних процесів має здійснюватися з врахуванням наведених співвідношень, тобто за врахування стрибків струму в моменти зміни

параметрів індуктивності L .

Для цього також може бути задіяний ітераційний процес. Як один із способів організації ітераційного розрахунку можна запропонувати на першому кроці здійснити розрахунок з усередненими значеннями індуктивності $L_{CP1} = (L_1 + L_2) / 2$ чи $L_{CP2} = (L_1 \cdot t_1 + L_2 \cdot (T - t_1)) / T$.

4.2. Розрахунок інтегральних характеристик електромагнітних процесів у ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії

Для оцінки характеристик струму, оптимального вибору параметрів елементів ЕТК-Smart необхідно визначити низку характеристик та коефіцієнтів. Відповідно до діючих нормативних документів [1, 2, 31] основними є діючий та середній струми, амплітудні максимуми та мінімуми, коефіцієнти форми, пульсацій за амплітудним значенням, пульсацій за діючим значенням, пульсацій за середнім значенням, амплітуди. У разі гармонічного аналізу функцію досліджуються також коефіцієнти гармонік, амплітуди гармонік тощо. Отримання функцій струмів на інтервалах у аналітичному вигляді дає змогу здійснити точні розрахунки цих коефіцієнтів та уникнути застосування чисельних методів з похибками.

Аналіз миттєвих функцій струмів та напруг доцільно доповнити аналізом інтегральних характеристик: середніх (U_{CP}, I_{CP}) та діючих (U_d, I_d) значень напруги і струму, коефіцієнтів пульсацій за струмом K_{III} та напругою K_{PU} , активної P , реактивної Q_ϕ та повної S потужностей [31, 39].

Визначення інтегральних характеристик за відомих миттєвих значень струму передбачає визначення сумарної кількості ІСС – m_Σ , які визначаються суміщенням на часовій осі інтервалів сталості (незмінності) параметрів еквівалентного генератора (m_r) та незмінності параметрів активного опору (m_R): $m_\Sigma \leq m_R + m_r$.

1. Розрахунок середніх струмів.

Розрахунок середнього струму здійснюється за формулою:

$$i_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt. \quad (4.1)$$

За результатами розрахунку відомі аналітичні вирази струмів на інтервалах. Виходячи з цього та формули (3.48), середній струм на періоді визначається так:

$$\begin{aligned} i_{CP} &= \frac{1}{T} \left[\int_0^{T_1} i_1(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} i_2(t) dt + \int_{T_2}^{T_3} i_3(t) dt + \dots + \int_{T_{n-1}}^{T_n} i_n(t) dt \right] = \\ &= \frac{1}{T} \left[\int_0^{\tau_1} i_1(t) dt + \int_0^{\tau_2} i_2(t) dt + \int_0^{\tau_3} i_3(t) dt + \dots + \int_0^{\tau_n} i_n(t) dt \right] = \left| Sef_i(t) = \int_0^{\tau_i} i_i(t) dt \right| = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \tau_j} \sum_{i=1}^n Sef_i. \quad (4.2) \end{aligned}$$

Для більш узагальненого випадку, коли необхідно розрахувати середній струм на окремій ділянці періоду, маємо формулу

$$i_{CP,a,b} = \frac{1}{\sum_{j=a}^b \tau_j} \sum_{i=a}^b Sef_i, \quad (4.3)$$

де a – номер інтервалу, від якого починається розрахунок середнього струму; b – номер інтервалу, яким закінчується розрахунок середнього струму, включно.

Визначимо функції $Sef_i(t) = \int_0^{\tau_i} i_i(t) dt$ для всіх видів базових функцій, розглянутих у алгоритмі. Зведемо співвідношення у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Визначення інтегральних складових для базових функцій

№	$i_i(t)$	$Sef_i(t) = \int_0^{\tau_i} i_i(t) dt$
1	Прямокутно-кусова функція $i_i(t) = \frac{U_i}{R_i}(1 - e^{-\sigma_i t}) + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = I_i \tau_i + \frac{(Ex_i - I_i)}{\sigma_i} (1 - e^{-\sigma_i \tau_i})$
2	Синусоїдально-кусова функція $i_i(t) = I_i \cdot [\sin(\omega_i \cdot t + \alpha_i - \psi_i) - \sin(\alpha_i - \psi_i) \cdot e^{-\sigma_i t}] + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = -\frac{I_i}{\omega_i} [\cos(\omega_i \tau_i + \alpha_i - \psi_i) - \cos(\alpha_i - \psi_i)] + \frac{Ex_i}{\sigma_i} (1 - e^{-\sigma_i \tau_i})$
3	Зростаюча експоненціальна функція $i_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-\vartheta_i t}}{R_i - \vartheta_i L} + \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[\frac{1}{R_i - \vartheta_i L} \left[\frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} - \frac{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})}{\vartheta_i} \right] + \frac{1}{R_i} \left[\tau_i - \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] \right] + \frac{S_i \tau_i}{R_i} - \frac{S_i}{R_i} \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} + Ex_i \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i}$
4	Спадаюча експоненціальна функція $i_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[-\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-\vartheta_i t}}{R_i - \vartheta_i L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_i t})e^{-\vartheta_i t}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[\frac{1}{R_i - \vartheta_i L} \left[\frac{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})}{\vartheta_i} - \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] - \frac{1}{R_i} \left[\tau_i e^{-\vartheta_i \tau_i} - \frac{e^{-\vartheta_i \tau_i} (1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] \right] + \frac{S_i \tau_i}{R_i} - \frac{S_i}{R_i} \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} + Ex_i \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i}$
5	Зростаюча похила функція $i_i(t) = \frac{E_i}{L \tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = \frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} \left[\frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} - \tau_i \right] + \frac{S_i}{R_i} \left[\tau_i - \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] + \frac{E_i \tau_i}{L \tau_i \sigma_i} + Ex_i \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i}$
6	Спадаюча похила функція $i_i(t) = -\frac{E_i}{L \tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + (E_i + S_i) \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + Ex_i \cdot e^{-\alpha_i t}$	$Sef_i(t) = \frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} \left[\tau_i - \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] - \frac{E_i \tau_i}{L \tau_i \sigma_i} + \frac{(E_i + S_i)}{R_i} \left[\tau_i - \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i} \right] + Ex_i \frac{(1 - e^{-\sigma_i \tau_i})}{\sigma_i}$

2. Розрахунок діючих струмів.

Розрахунок діючого струму здійснюється за формулою

$$i_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} . \quad (4.4)$$

За результатами розрахунку відомі аналітичні вирази струмів на інтервалах. Виходячи з цього та формули (4.4), діючий струм на періоді визначається так:

$$i_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_i} i_i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_i} i_i^2(t) dt = dep_i(t)} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \sum_{i=1}^n dep_i(t)} . \quad (4.5)$$

Для більш узагальненого випадку, коли необхідно розрахувати середній струм на окремій ділянці періоду, маємо формулу

$$i_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=a}^b \tau_i} \sum_{i=a}^b dep_i(t)} , \quad (4.6)$$

де a – номер інтервалу, від якого починається розрахунок середнього струму;
 b – номер інтервалу, яким закінчується розрахунок середнього струму включно.

Визначимо функції $\int_0^{\tau_i} i_i^2(t) dt = dep_i(t)$ для всіх видів функцій, розглянутих у алгоритмі. Зведемо співвідношення у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 –Визначення інтегральних складових, наведених в алгоритмі

Тип	$\int_0^{\tau_i} i_i^2(t) dt = dep_i(t)$
1	$dep_i(t) = I_i^2 \tau_i + 2I_i (Ex_i - I_i) \frac{1 - e^{-\sigma_i \tau_i}}{\sigma_i} + (Ex_i - I_i)^2 \frac{1 - e^{-2\sigma_i \tau_i}}{2\sigma_i} .$
2	Кусково-синусоїдальна функція: $dep_i(t) = \frac{I_i^2}{\omega_i} \left[-\frac{1}{2} \cos(\omega_i \tau_i + \alpha_i - \psi_i) \sin(\omega_i \tau_i + \alpha_i - \psi_i) + \frac{1}{2} \omega_i \tau_i + \frac{1}{2} \cos(\alpha_i - \psi_i) \sin(\alpha_i - \psi_i) \right] +$ $+ 2I_i [Ex_i - I_i \sin(\alpha_i - \psi_i)] \left[-\frac{\omega_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} e^{-\sigma_i \tau_i} \cos(\omega_i \tau_i + \alpha_i - \psi_i) - \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} e^{-\sigma_i \tau_i} \sin(\omega_i \tau_i + \alpha_i - \psi_i) + \right.$ $\left. + \frac{\omega_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \cos(\alpha_i - \psi_i) + \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \sin(\alpha_i - \psi_i) \right] + [Ex_i - I_i \sin(\alpha_i - \psi_i)] \frac{1}{2\sigma_i} [1 - e^{-2\sigma_i \tau_i}]$

3	<p>Зростаюча експоненціальна функція:</p> $dep_i(t) = \int_0^{\tau_i} (A_i e^{-\sigma_i t} + B_i e^{-g_i t} + C_i)^2 dt = C^2 \tau_i - \frac{1}{2} \frac{A_i^2}{\sigma_i} e^{-2\sigma_i \tau_i} - \frac{1}{2} \frac{B_i^2}{g_i} e^{-2g_i \tau_i} +$ $+ \frac{2B_i C_i}{g_i} e^{-g_i \tau_i} + \frac{2A_i C_i}{g_i + \sigma_i} e^{-(g_i + \sigma_i) \tau_i} + 2 \frac{A_i C_i}{\sigma_i} + \frac{1}{2} \frac{A_i^2}{\sigma_i} + \frac{1}{2} \frac{B_i^2}{g_i} - 2 \frac{B_i C_i}{g_i} - 2 \frac{A_i C_i}{g_i + \sigma_i},$ <p>де $A_i = \left[\frac{E_i}{1 - e^{-g_i \tau_i}} \left[\frac{1}{R_i - g_i L} - \frac{1}{R_i} \right] - \frac{S_i}{R_i} + Ex_i \right]$; $B_i = \left[\frac{E_i}{(1 - e^{-g_i \tau_i})(R_i - g_i L)} \right]$; $C_i = \left[\frac{E_i}{1 - e^{g_i \tau_i}} \right]$.</p>
4	<p>Спадаюча експоненціальна функція: вираз, аналогічний п.3, відрізняється коефіцієнтами:</p> $A_i = \left[\frac{E_i}{1 - e^{-g_i \tau_i}} \left[-\frac{1}{R_i - g_i L} + \frac{e^{-g_i \tau_i}}{R_i} \right] - \frac{S_i}{R_i} + Ex_i \right]; B_i = \left[\frac{E_i}{(1 - e^{-g_i \tau_i})(R_i - g_i L)} \right];$ $C_i = \left[-\frac{E_i}{1 - e^{-g_i \tau_i}} + \frac{S_i}{R_i} \right].$
5	<p>Лінійно-зростаюча функція</p> $dep_i(t) = \int_0^{\tau_i} (A_i e^{-\sigma_i t} + B_i t + C_i)^2 dt = -\frac{1}{\sigma_i} \left[\frac{1}{2} A_i^2 e^{-2\sigma_i \tau_i} + 2 \frac{A_i B_i}{\sigma_i} [e^{-\sigma_i \tau_i} \sigma_i \tau_i + e^{-\sigma_i \tau_i}] + 2 A_i C_i e^{-\sigma_i \tau_i} - \right.$ $\left. - \frac{1}{3} B_i^2 \sigma_i \tau_i^3 - B_i \sigma_i \tau_i^2 C_i - C_i^2 \sigma_i \tau_i - \frac{1}{2} A_i^2 - 2 \frac{A_i B_i}{\sigma_i} - 2 A_i C_i \right],$ <p>де $A_i = \left[\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} - \frac{S_i}{R_i} + Ex_i \right]$; $B_i = \left[\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} \right]$; $C_i = \left[-\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} + \frac{S_i}{R_i} \right]$.</p>
6	<p>Лінійно-спадаюча функція. Вираз аналогічний п.5, відрізняється коефіцієнтами:</p> $A_i = \left[-\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} - \frac{E_i + S_i}{R_i} + Ex_i \right]; B_i = \left[-\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} \right]; C_i = \left[\frac{E_i}{L \tau_i \sigma_i^2} + \frac{E_i + S_i}{R_i} \right].$

За відомими значеннями середніх та діючих струмів можна визначити коефіцієнти форми, пульсацій за амплітудним значенням, пульсацій за діючим значенням, пульсацій за середнім значенням, амплітуди.

Інтегральні характеристики P , Q_ϕ та S розраховуються за формулами [39]

$$P = \int_{t=0}^{T^*} u(t)i(t)dt; \quad S = UI; \quad Q_\phi = (S^2 - P^2)^{1/2}. \quad (4.7)$$

Для відомої моделі навантаження обчислення спрощується. Так, для струму навантаження $i(t)$ у разі $n_R = 1$ формула для визначення активної потужності P записується у вигляді

$$P = \sum_{j=1}^{m_R} (R_j / T^*) \int_{t=0}^{\Delta t_j} i_{R_j}(t)^2 dt, \quad (4.8)$$

де $j = 1, \dots, m_R$, m_R – кількість виділених інтервалів сталості опору $R(t) = R_j$; $t \in \Delta t_j = (t_{j-1} - t_j)$, $j = 1, \dots, m_R$ на періоді T^* . Величина $i_{R_j}(t)$ визначається залежно від моделі навантаження. Так, для послідовного RL -навантаження $i_{R_j}(t) = i(t), t \in [0, T^*]$ – вхідному струму навантаження.

За умови $n_R > 1$ вираз (4.8) набуде матричного виду із введенням додаткового знаку суми, що відображає множинність опорів $R_j, l = 1, \dots, n_R$, у моделі навантаження та визначення величини $i_{R_j}(t)$ із побудови рівняння виходу.

Отримання енергетичних характеристик на ІСС у аналітичному вигляді дає змогу здійснити точні розрахунки цих коефіцієнтів та уникнути застосування чисельних методів з похибками. Побудовані аналітичні співвідношення дають змогу пришвидшити розрахунок інтегральних характеристик залежно від структури навантаження системи електроживлення та виду множини аналітичних функцій, якими моделюється еквівалентним генератором ЕРС.

4.3. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завад на електромагнітні процеси в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії

Дія завади на змінному струмі. Нехай лінія змінного струму характеризується активним опором $R_{\text{л}}$ та реактивним елементом $L_{\text{л}}$. Покладемо, що у виділеній системі до лінії підключено джерело змінного струму з частотою

f_m . Для розробки алгоритму оцінки дії періодичних завад на змінному струмі використаємо метод накладання з поєднанням методу розщеплення сигналів (представлення функції еквівалентного генератора дією кількох генераторів).

Алгоритм оцінки дії періодичних завад на змінному струмі містить наступні кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завад $U_3(t)$ у лінії змінного струму;
2. Ідентифікація параметрів періодичної функції завади $U_3(t)$, наприклад, амплітуди U_{M3} , частоти f_3 у разі дії синусоїдальної завади;
3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності L_3 , які можуть додатково «індукуватися» (викликатися) дією завади на частоті f_3 в лінії змінного струму. Можливі ситуації, коли значення, наприклад, індуктивності, таких «індукованих» реактивних елементів будуть нульові або такі малі за величиною, що ними можна знехтувати ($L_3 = 0$).
4. Розрахунок струму $i_3(t)$ в лінії змінного струму з параметрами R_L та L ($L = L_L + L_3$) у разі дії періодичної завади $U_3(t)$;
5. Розрахунок діючого та максимального значень струму для функції $i_3(t)$ на періоді $T_3 = 1 / f_3$.
6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії змінного струму на активному елементі R_L у разі дії завади періодичної форми $U_3(t)$:
 - потужність втрат на активному елементі лінії у разі дії завади:

$$P_3 = R_L \cdot I_{3d}^2;$$
 - втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу T_T :

$$W_{dT} = P_3 \cdot T_T;$$
7. Розрахунок максимальної накопиченої електромагнітної енергії на реактивному елементі L у разі дії завади:

$$W_{L3} = L \cdot I_{3M}^2 / 2,$$
 де I_{3M} – максимальне значення струму у лінії, обумовленого дією періодичних завад;
8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії змінного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів:

$$K_{31} = P_3 / Q_3;$$

$$K_{32} = (P_3 \cdot f_M) / (P_{AC} \cdot f_3),$$

де P_{AC} – потужність втрат у лінії у разі дії змінної напруги.

За цим же алгоритмом можна оцінити сумарний вплив одночасної дії кількох завад, а також парціальний внесок у загальне спотворення дії окремої завади.

Дія завади на постійному струмі. Нехай лінія постійного струму характеризується активним опором r_L .

Алгоритм оцінки дії періодичних завад на постійному струмі включає такі кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завад $U_3(t)$.
2. Ідентифікація параметрів періодичної функції $U_3(t)$: форми, зокрема, амплітуди U_{M3} , частоти f_3 .
3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності L , які «індукуються» (викликаються) дією завади на частоті f_3 в лінії постійного струму. Можливі ситуації, коли значення цих реактивних елементів будуть нульові або такі малі за значеннями, що ними можна знехтувати ($L = 0$).
4. Розрахунок струму $i_3(t)$ в лінії постійного струму з параметрами R_L у разі дії періодичної завади $U_3(t)$.
5. Розрахунок діючого значення струму для функції $i_3(t)$ на періоді $T_3 = 1 / f_3$.
6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії постійного струму у разі дії завади періодичної форми $U_3(t)$:

– потужність втрат на активному елементі у разі дії завади

$$P_3 = R_L \cdot I_{3д}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу T_T : $W_{д,Т} = P_3 \cdot T_T$.

7. Аналіз потужність накопичення електромагнітної енергії на реактивному елементі L при дії завади:

$$Q_3 = R_L \cdot I_{3М}^2 / 2,$$

де I_{3M} – максимальне значення струму в лінії, обумовленого дією періодичних завад.

8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії постійного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів:

$$K_{31} = P_3 / Q_3;$$

$$K_{32} = P_3 / P_{CD},$$

де P_{CD} – потужність втрат у лінії у разі дії постійної напруги.

Для моделювання роботи ЕТК-Smart під дією імпульсних періодичних завад розглянемо випадок дії прямокутних періодичних імпульсів зі змінною полярністю. Знайдемо значення струму на компенсаторі у разі RL -навантаження (див. рис. 4.1) для того, щоб можна було розрахувати, які значення струму діють на компенсатор у режимі імпульсних завад [70].

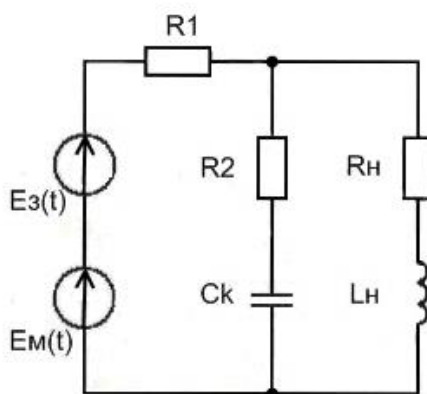


Рис 4.1 – Модель системи з компенсатором реактивної потужності та RL -навантаженням у разі дії генератора завад

Вирішення проблеми стабільної роботи системи під дією завад слід розглядати на спрощеній моделі: генератор – ємнісний компенсатор – RL -навантаження. Використовуючи таку модель зручно прослідкувати зміни в роботі компенсатора у разі подачі імпульсів завад у системи, в нашому випадку – періодичних прямокутних завад зі змінною полярністю.

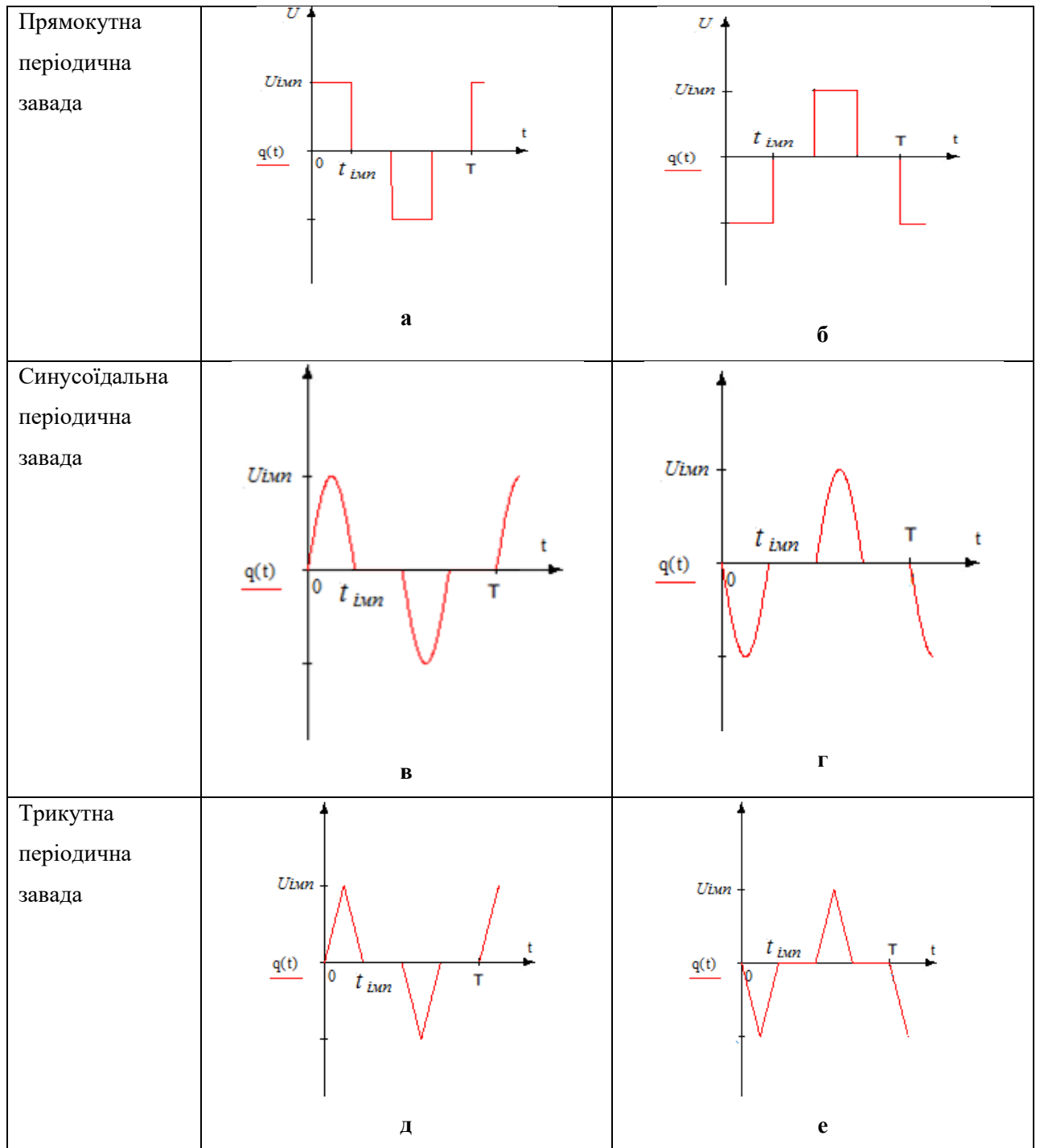
Змодельюємо систему, де для дослідження впливу імпульсних завад на роботу компенсатора за допомогою генератора періодичних імпульсів будемо подавати прямокутні завади змінної полярності в систему з синусоїдальною напругою. Для порівняльної характеристики будемо змінювати окремі параметри, щоб оцінити їх вплив на режим роботи ЕТК-Smart, а саме: фазу імпульсу завад, ширину імпульсу, тривалість імпульсу, амплітуду імпульсу завад. Для визначення впливу завад на синусоїдальний генератор знайдемо струм на компенсаторі без дії імпульсів завад.

Найбільш поширеними є прямокутна періодична завада, синусоїдальна періодична завада та трикутна періодична завада (див. табл. 4.3).

Зображення сигналу для квазіусталеного процесу для періодичних сигналів завади прямокутної, синусоїдальної та трикутної форми на першому інтервалі з урахуванням $n = 4$, $T_i = 4T_{imp}$, $U_1 = U_{imp}$, $U_2 = 0$, $U_3 = -U_{imp}$, $U_4 = 0$ наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Графік періодичної завади

Опис завади	Графік періодичної завади
-------------	---------------------------



Таблиця 4.4 – Зображення сигналу для квазіусталеного процесу для періодичних сигналів завади

Опис	Зображення сигналу для квазіусталеного процесу для
------	--

завади	періодичних сигналів завади
Прямокутна періодична завада	$U(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_i})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} =$ $= \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} + U_3 e^{-(3-1)pT_{imp}} + U_4 e^{-(4-1)pT_{imp}} \right] =$ $= \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 + U_2 e^{-pT_{imp}} + U_3 e^{-2pT_{imp}} + U_4 e^{-3pT_{imp}} \right] = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right]$
Синусоїдальн а періодична завада	$U(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_i})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} =$ $= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} + U_3 e^{-(3-1)pT_{imp}} + U_4 e^{-(4-1)pT_{imp}} \right] =$ $= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 + U_2 e^{-pT_{imp}} + U_3 e^{-2pT_{imp}} + U_4 e^{-3pT_{imp}} \right] =$ $= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right]$
Трикутна періодична завада	$U(p) = \left[\left(\frac{1}{(T/2)p^2} - \frac{2e^{-p(T/2)}}{(T/2)p^2} + \frac{e^{-pT}}{(T/2)p^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}}{(1 - e^{-pT_i})} \right] =$ $= \left[\left(\frac{1}{(T_{imp}/2)p^2} - \frac{2e^{-p(T_{imp}/2)}}{(T_{imp}/2)p^2} + \frac{e^{-pT_{imp}}}{(T_{imp}/2)p^2} \right) \frac{1}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \times \right.$ $\times \left. \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} + U_3 e^{-(3-1)pT_{imp}} + U_4 e^{-(4-1)pT_{imp}} \right] \right] =$ $= \left[\left(\frac{1}{(T_{imp}/2)p^2} - \frac{2e^{-p(T_{imp}/2)}}{(T_{imp}/2)p^2} + \frac{e^{-pT_{imp}}}{(T_{imp}/2)p^2} \right) \frac{1}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 + U_2 e^{-pT_{imp}} + U_3 e^{-2pT_{imp}} + U_4 e^{-3pT_{imp}} \right] \right] =$ $= \left[\left(\frac{1}{(T_{imp}/2)p^2} - \frac{2e^{-p(T_{imp}/2)}}{(T_{imp}/2)p^2} + \frac{e^{-pT_{imp}}}{(T_{imp}/2)p^2} \right) \frac{1}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right] \right]$

Використаємо множину еквівалентних генераторів електроживлення та множину еквівалентних генераторів періодичних імпульсів, що моделюють роботу ПЕЕ в ЕТК-Smart [70]. Після перетворення еквівалентних генераторів модель системи буде виглядати як з'єднання $\{\Gamma_{\text{ЕКВ}}\} - \{N\}$, де множина $\Gamma_{\text{ЕКВ}}$ вміщує в собі множини описаних генераторів електроживлення та генераторів завад (див. рис. 4.2). Ця модель описується таким рівнянням:

$$E_{\text{ЕКВ.Г,л}}(t) = \sum_{i=1}^n E_{\text{ЕКВ.Г,i}}(t) = \sum_{i \in M} E_{\text{ЕКВ.Г,i}} + \sum_{j \in L} E_{\text{ЕКВ.Г,j}}, \quad (4.9)$$

де $E_{\text{екв.Г.,}n}(t)$ – змінна в часі функція, що описує n еквівалентних генераторів; n – загальна кількість всіх еквівалентних генераторів; M – множина еквівалентних генераторів електроживлення; L – множина еквівалентних генераторів завад; i – номер еквівалентного генератора електроживлення; j – номер еквівалентного генератора завад.

Особливістю побудованої моделі є те, що рівняння (4.9) дає змогу описати та промодельовати систему з довільною кількістю генераторів для змінних режимів роботи, зокрема ті системи, які працюють з різними частотами. Головною особливістю таких систем є циклічні зміни параметрів складових частин системи. До цих змінюваних у часі параметрів відносяться: періоди роботи елементів системи ($T_{\Gamma} \neq T_{\text{ПР}} \neq T_{\text{Н}}$); амплітуди генераторів; активна та реактивна складові навантаження; тривалість та періодичність дії завад, що генерує генератор періодичних імпульсів завад тощо.

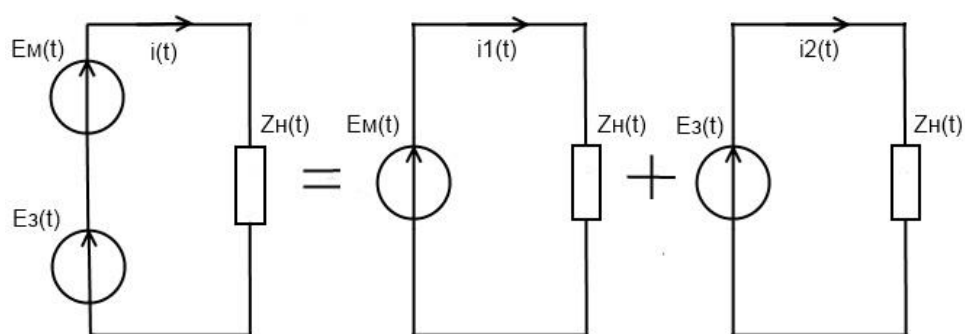


Рисунок 4.2 – Принцип побудови моделі з еквівалентними генераторами завад ($E_3(t)$) та живлення ($E_M(t)$)

Розглянемо випадки роботи генератора завад, додатній імпульс якого співпадає або не співпадає з додатнім півперіодом генератора електроживлення. На основі цих моделей були отримані залежності параметрів роботи системи від режимів роботи та особливостей генератора завад. Всі значення зміни за віссю часу (вісь абсцис) бралися кратні періоду роботи генератора сигналу електроживлення. Зміна амплітуди імпульсів завад нормувалася відносно амплітуди першої гармоніки генератора живлення. Власне амплітуда завад змінювалася в межах 0,5 – 20 В. Частота генератора живлення: $f_{\Gamma} = 50$ Гц.

Нижче наведені результати моделювання з використанням прямокутної, синусоїдальної та трикутної форми сигналу за наведеними даними. Кожен з шести графіків відповідає своєму значенню амплітуди (0,5; 1; 2; 4; 8; 20 В) імпульсів завад (див. рис. 4.3 – 4.5). За горизонтальною віссю показана зміна часових характеристик відносно періоду роботи генератора електроживлення (T).

Моделювання виконано у разі співпадіння (рис. 4.3а, 4.4а та 4.5а) та неспівпадіння (рис. 4.3б, 4.4б та 4.5б) додатнього імпульсу генератора завад ($E_z(t)$) з додатнім півперіодом роботи генератора електроживлення ($E_M(t)$). Аналізуючи результати розрахованих даних, можна стверджувати, що діюче значення струму зростає зі збільшенням тривалості та амплітуди імпульсів завад у разі співпадіння імпульсів трикутної або синусоїдальної форми сигналу. Водночас відбувається зменшення значення струму при неспівпадінні імпульсів завад.

На рис. 4.3 – 4.5 наведено сімейства характеристик, що описують залежність діючого значення струму від частоти надходження імпульсів завад та їхньої амплітуди, у разі прямокутної, трикутної та синусоїдальної форм сигналу. На рисунках показано, що відбувається значне зменшення діючого значення струму у разі зменшення періоду (збільшення частоти) надходження імпульсів завад за співпадіння імпульсів та збільшення струму за неспівпадіння імпульсу.

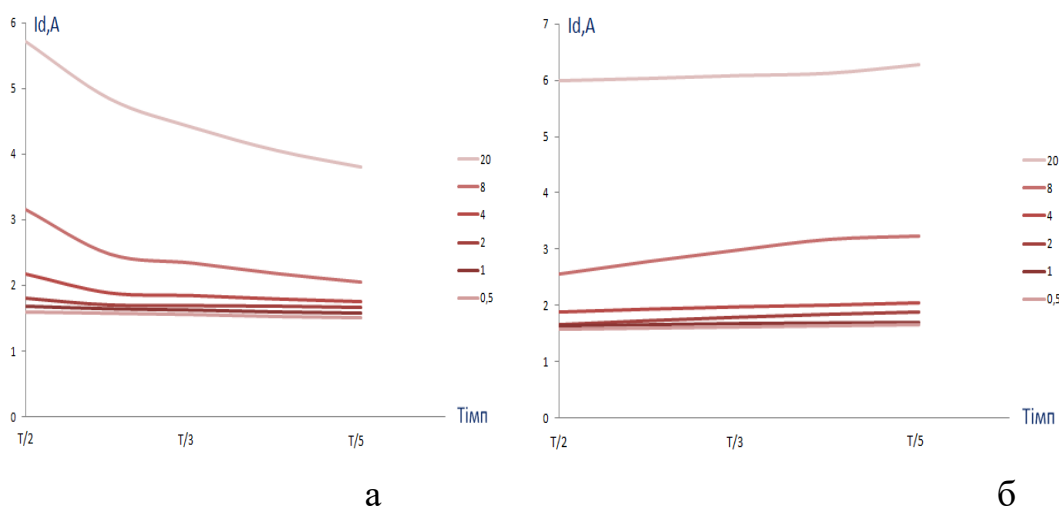


Рисунок 4.3 – Залежність діючого значення струму від періоду імпульсів (T_{imp}) при прямокутній формі сигналу

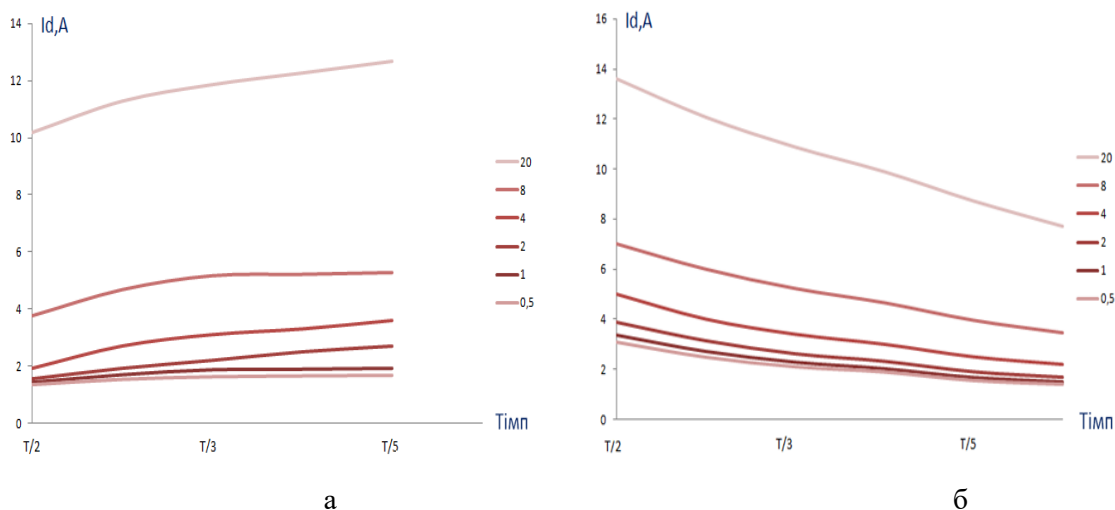
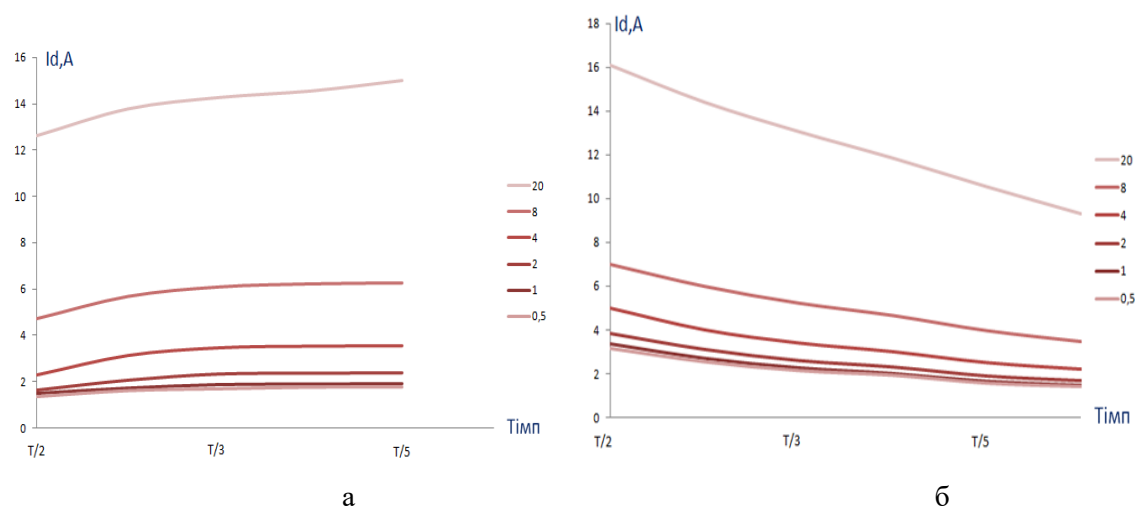


Рисунок 4.4 – Залежність діючого значення струму від періоду імпульсів (T_{imp}) за трикутної форми сигналу



Риснок 4.5 – Залежність діючого значення струму від періоду імпульсів (T_{imp}) за синусоїдальної форми сигналу

Узагальнюючи проведене моделювання, на основі отриманих графіків можна зазначити, що на форму вихідного сигналу впливають амплітуда та час появи імпульсних завад. Залежність від цих параметрів змінюється величина діючого значення струму. При чому було доведено, що при співпадінні та неспівпадінні додатнього імпульсу генератора завад з додатнім півперіодом роботи генератора електроживлення значення діючого струму має обернений вигляд.

4.4. Оптимізація режимів роботи перетворювачів електроенергії в ETK-Smart

Для здійснення оптимізаційної процедури в ЕТК-Smart, до складу яких входять кілька ПЕЕ, доцільним є розгляд окремо виділеного ПЕЕ в комбінації з іншими перетворювачами, генераторами, навантаженнями та вплив характеристик і робочих коефіцієнтів цих складових на загальну роботу системи. У цьому разі існує проблема в ефективній передачі генератором сигналу через ПЕЕ у навантаження. Окрім вирішення апаратної проблеми треба зазначити і програмну, тобто використання потрібного режиму роботи вентильного ПЕЕ за допомогою системи керування (СК), а точніше – за допомоги зміни режиму роботи вентильних елементів (підбір кута α). До наведених вище ПЕЕ належать: випрямлячі; інвертори; регулятори змінної напруги (РЗН); широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП) тощо.

Для опису кожного з указаних перетворювачів наведемо робочі і коефіцієнти кожного типу ПЕЕ, регулюючий параметр та межі зміни регулюючого параметра:

1. Випрямлячі:

Для j -го випрямляча задано період роботи генератора $T_j: [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$.

Кути регулювання α_j змінюються в межах: $\alpha_{GP,j_1} < \alpha_j < \alpha_{GP,j_2}$;

Для кожного типу випрямлячів у СЕП з синусоїдальним генератором потрібно визначити $\alpha_{GP,j} : t_{GP,j} = \frac{\alpha_{GP,j}}{2\pi} \cdot T_j$.

У свою чергу, залежно від типу випрямляча в СК необхідно враховувати можливу зміну кутів $\alpha_j \rightarrow \left(\frac{2\pi}{m} - \alpha_j \right)$.

2. РЗН:

Для j -го РЗН задано період роботи $T_j: [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$.

Кути регулювання α_j змінюються в межах $\alpha_{GP,j_1} < \alpha_j < \alpha_{GP,j_2}$;

Для кожного типу РЗН в СЕП з синусоїдальним генератором напруги

потрібно визначити $\alpha_{GP,j} : t_{GP,j} = \frac{\alpha_{GP,j}}{2\pi} \cdot T_j$.

У свою чергу, залежно від типу РЗН в системах керування (СК) необхідно враховувати можливу зміну кутів $\alpha_j \rightarrow \left(\frac{2\pi}{m} - \alpha_j \right)$.

3. Інвертори:

Для j -го інвертора задано період роботи $T_j : [0, T_j]$; $f_j = \frac{1}{T_j}$.

Початковий момент включення Δt_j змінюється в межах $[\Delta t_j; \Delta t_j + T_j]$; $0 < \Delta t_j < T_j$.

4. ШПП:

Для j -го ШПП задано період роботи $T_j : [0; T_j]$.

Початковий момент включення Δt_j змінюється в межах $[\Delta t_j; \Delta t_j + T_j]$, де $0 < \Delta t_j < T_j$.

У загальному випадку метою оптимізаційної процедури є мінімізація інтегральних характеристик споживання струму. Залежно від виду генератора змінюються і потрібні параметри роботи системи, які треба отримати для підвищення ефективності роботи ЕТК-Smart. Для генератора синусоїдальної напруги треба визначити максимальне значення струму, діюче значення струму, коефіцієнт пульсацій.

СЕП з генератором синусоїдальної напруги описується такими співвідношеннями:

– миттєвий струм генератора:

$$i_T(t) = \sum_{j=1}^{n_B} i_{B,j}(t) + \sum_{j=1}^{n_P} i_{P,j}(t),$$

де $i_{B,j}(t)$ – миттєвий струм j -го випрямляча; $i_{P,j}(t)$ – миттєвий струм j -го РЗС;

– діюче значення струму генератора:

$$I_{\hat{A}}^2 = (1 / \dot{O}_{\hat{O}}) \sqrt{\int_0^{T_{\hat{O}}} \dot{z}_{\hat{A}}^2(t) dt};$$

$$T_{\hat{O}} = \hat{I} \hat{N} \hat{E} \{T_j', j' \leq \overline{1, n_B}; T_j'', j'' \leq \overline{1, n_P}\}.$$

Процедура оптимізації відбору потужності в локальних СЕП з ПЕЕ є методом знаходження діючих та миттєвих значень. Для СЕП з генераторами синусоїдальної напруги:

$$I_{\hat{A}} \rightarrow \min; I_{MAX} \rightarrow \min;$$

$$\alpha - \text{var};$$

$$|I_{d,\hat{A},j} - I_{d,\hat{A},j\hat{i}\hat{i}}| \leq \varepsilon_{\hat{A}}; \quad \varepsilon_{\hat{A}} \geq 0;$$

$$|I_{1,(i),p,j} - I_{1,(i),j,p,\hat{i}\hat{i}}| \leq \varepsilon_{\hat{D}}; \quad \varepsilon_{\hat{D}} \geq 0.$$

Фактично процес оптимізації базується на принципі взаємокомпенсації, де «вирівнювання» графіка споживання струму від генератора синусоїдальної напруги здійснюється за рахунок зміни моментів комутації клапанів, що забезпечують нормальну роботу різних ПЕЕ.

Додатковими функціональними залежностями для збільшення ефективності роботи системи, зокрема, формування законів керування є:

1) характер впливу елементів один на одного, окремих типів завод (рівнів ЕМС);

2) складові додаткових втрат (декомпозиція потужності Фризе)

$$Q_{\phi} = \sqrt{S^2 - P^2}; I_p^2 = \sum_{j=1}^{n_{\hat{O}}} I_{p,j}^2;$$

3) миттєві значення реактивного струму: $i_{\hat{O}} = i(t) - i_a(t)$;

4) компенсація реактивної потужності (реактивного струму);

5) зниження втрат електроенергії в елементах;

6) забезпечення нормальної роботи технічного навантаження (процесу);

7) аналіз впливу завод та розробка заходів з усунення їх впливу на вихідні характеристики.

На завершення викладення теоретичної частини дисертаційних досліджень сформулюємо обґрунтування доцільності застосування розробленої методології аналізу стаціонарних режимів роботи навантажень електротехнічних Smart-

комплексів. Розроблену методологію аналізу доцільно застосовувати у разі аналізу груп навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінки можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень) за реалізації механізмів керування попитом (Demand Side Management, DSM), а також оцінки рівнів узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами, аналізу впливу завад, коли період дії основного сигналу та завади не співпадають.

Крім того, розроблена методологія аналізу може бути застосована у разі вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв, аналізу процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах, стабілізаторах напруги, трансформаторах, регульованих під напругою.

Також з використанням методу накладання можна отримати аналітичні вирази протікання електромагнітних процесів у разі дії двох еквівалентних генераторів $E_{\text{ЕКВ1}}(t)$ та $E_{\text{ЕКВ2}}(t)$ з некратними періодами роботи.

Власне побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому випадку буде забезпечуватися єдиний методологічний підхід до розгляду локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі.

Крім того, побудовані інтегральні показники (характеристики) в аналітичному вигляді можуть бути використані у разі формування цільової функції оптимізаційного процесу, вирішення окремих питань оцінки стійкості роботи системи.

Запропонована методологія аналізу може бути однотипно використана як у разі аналізу електромагнітних процесів, так і у разі формування законів керування в аналітичному вигляді для систем керування.

Аналітичні вирази можуть бути побудовані у разі розгляду періодичних функцій напруги та струму на інтервалі часу, який описує циклічну зміну

параметрів, що значно перевищує період мережевої напруги.

Розроблена методологія аналізу може бути рекомендована до застосування аналізу електротехнічних та електронних кіл, де також можна виділити окремі типи навантажень (підсхем), функціонування яких може моделюватися елементами з циклічно-змінюваними параметрами.

Висновки до розділу 4

1. Проаналізовано особливості аналізу електротехнічних комплексів з нелінійними елементами шляхом аналізу процесів у разі змін активних та реактивних навантажень, що дає змогу враховувати відповідні зміни параметрів при розрахунках електромагнітних процесів за допомогою аналітичних методів.

2. Отримано аналітичні вирази для розрахунку середніх та діючих струмів шляхом здійснення відповідних математичних розрахунків щодо аналітичних виразів для струмів для різних видів базових функцій сигналів генераторів, що дає змогу здійснювати аналітичні розрахунки відповідних характеристик струмів, у тому числі необхідних для визначення параметрів якості електричної енергії.

3. Проведено аналіз можливостей застосування отриманих аналітичних виразів для розрахунків струмів у електротехнічних комплексах з циклічно змінюваними параметрами щодо розрахунку кондуктивних завад шляхом здійснення відповідних розрахунків для різних видів сигналів генераторів, що дало змогу оцінити можливості застосування зазначених моделей електромагнітних процесів.

Удосконалено методологію оцінки впливу кондуктивних періодичних завад на протікання усталеного режиму в ЕТК ДЕ, розрахунку інтегральних характеристик

РОЗДІЛ 5 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ НАВАНТАЖЕНЬ ЕТК-SMART ДЛЯ SMART-ТЕХНОЛОГІЙ

5.1. Пакет програм аналізу електромагнітних процесів у ЕКТ-Smart з циклічно-змінюваними параметрами

Для автоматизації розрахунків наведений алгоритм реалізовано на ЕОМ у вигляді проблемно орієнтованого програмного модуля MOSG-1.0 за допомогою мов програмування вищого порядку для забезпечення можливості використання стандартних програмних елементів та наочного наведення результатів розрахунків [32].

Близькою за методологією та реалізацією до наведеного алгоритму є програма «Jigrein». Особливістю цієї програми є інтерактивність моделюючого середовища. За основу візуалізації береться графічний векторний редактор. За допомогою стандартних блок-схем програмних модулів створюються моделі ЕТК-Smart з можливістю інтерактивного отримання діаграм напруги, струму та потужності з обраних точок. Після компілювання отримана схема може бути приєднана до інтернет-сайту у вигляді html-файлу [7].

За основу розробки програмного модуля розрахунків електромагнітних процесів у ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами обрано середовище програмування C++ Builder 6.0, яке суміщає в собі можливість роботи з будь-якими функціями на мові C++ та візуалізації розробленого коду за допомогою впроваджених засобів побудови інтерфейсу програми з мови програмування Delphi [54, 66]. Зазначимо, що у програмному середовищі C++ Builder існує можливість використати вже готові графічні компоненти у разі зміни математичної моделі алгоритму і в результаті отримати інтерактивний інтерфейс для розрахунку та аналізу виділеного режиму роботи моделей ЕТК-Smart [6].

На рис. 5.1 наведено узагальнений алгоритм роботи програми MOSG-1.0. Для реалізації програми введено базові функції для опису напруги еквівалентного генератора та початковий набір параметрів для кожної з базових функцій, які визначаються на першому етапі розрахунків для наведення напруги

генератора (функція рівня, синусоїдальна, експоненціальна, функція прямої пропорційності).



Рисунок 5.1 – Узагальнений алгоритм роботи програми MOSG-1.0

Залежно від обраної функції напруги змінюється набір початкових параметрів, які наведено у табл. 5.1. Часові показники режиму роботи навантаження вводяться у програму разом із величинами навантаження в кожний інтервал роботи системи. Далі за початковими даними здійснюється візуальна інтерпретація початкових параметрів роботи схеми за допомогою графічних компонентів з класу TCanvas чи компонента Chart (у середовищі C++ Builder), які за математичними функціями з алгоритму програми будують змінні в часі характеристики зміни напруги та параметрів навантаження [6, 23].

Розрахунок здійснюється на основі формул визначення струмів на інтервалах для різних видів функцій змін параметрів еквівалентного генератора та еквівалентного навантаження за такими етапами:

1. Визначення початкових часових констант моделі $\{Г\}–\{Н\}$.
2. Побудова графіків $U_G(t)$, $R_H(t)$, визначення періодів роботи генератора та навантаження, формування матриць моментів комутацій T_U , T_R , аналіз синхронності переключень генератора та навантаження для визначення спільних моментів комутацій.

3. Визначення початкових параметрів системи на інтервалах та наведення їх у вигляді матриць початкових параметрів напруги U_{MI} та опору R_{MI} .

4. Визначення параметрів струмів навантаження на інтервалах через матриці параметрів вільних та перехідних струмів на поточному періоді, проведення розрахунків для кожного наступного інтервалу періоду T_T .

За допомогою програмного модуля MOSG-1.0 розраховуються також інтегральні характеристики роботи схеми (діюче та середнє значення струму та напруги). Використовуючи метод розкладання функції в ряд Фур'є, доцільно отримати характеристики, які дають змогу оцінити якість сигналу на виході системи, наприклад, коефіцієнт гармонік K_G , коефіцієнт спотворень $K_{СП}$, коефіцієнт пульсацій $K_{П}$ та інші.

Таблиця 5.1 – Набір початкових параметрів (ідентифікаторів) програми

№ з/п	Вид базової функції	Ідентифікатори
1	Функція рівня $f_{Б,1}(t)=A$	Амплітуда – U_i .
2	Синусоїдальна функція $f_{Б,2}(t)= A \sin \omega t$	Частота – ω_i . Амплітуда початкової синусоїди – U_i . Значення відсічення переднього фронту – $\alpha_i = \omega_i \Delta t_i$, де Δt_i – відсічення переднього фронту у одиницях часу, якщо не подано у радіанах
3	Експоненціальна функція $f_{Б,3}(t)= A e^{-\sigma t}$	Амплітуда – E_i , тобто різниця між значенням функції генератора на початку та в кінці інтервалу. Коефіцієнт спадання – \mathcal{G}_i , що характеризує спадання власне базової експоненти. Амплітудне зміщення – S_i (при розрахунку випадків комутації навантаження та незмінній експоненціальній напрузі відбувається розбиття дії генератора відповідно спільних інтервалів).
4	Функція прямої пропорційності $f_{Б,4}(t)= At$	Амплітуда – U_i , тобто різниця між значенням функції генератора на початку та в кінці інтервалу; Амплітудне зміщення – S_i (при розрахунку випадків комутації навантаження та незмінній роботі генератора відбувається розбиття дії генератора відповідно спільних інтервалів; у такому випадку $S_i = E_i \tau_{i-1}$).

5.2. Основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ЕТК-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення

Нижче представлено характеристики алгоритму (методичного забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних Smart-комплексів і Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

Алгоритм (методичне забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів

1. Загальна оцінка виділеного для розгляду електротехнічного комплексу (Microgrid).
2. Виділення значимих та незначимих електромагнітних процесів.
3. Визначення контрольованих перетинів у структурній схемі Microgrid, тобто перетинів, де здійснюється аналіз.
4. Для кожного i -го виділеного перетину Π_i із множини контрольованих перетинів $\{\Pi_i\}$ визначення форми еквівалентного генератора напруги $E_{\text{ЕКВ}}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$.
5. Ідентифікація параметрів еквівалентного генератора напруги $E_{\text{ЕКВ}}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$; здійснення за необхідності апроксимації функцій $E_{\text{ЕКВ}}(t)$ та $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$ сумою базових функцій (синусоїдальні, експоненціальні, кусково-лінійні функції).
6. Побудова моделі електромагнітного процесу, тобто формування системи рівнянь, які описують процеси у i -го виділеного перетину.
7. Розрахунок струму $i(t)$ в аналітичному вигляді – побудова аналітичного розв’язку за допомогою розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення аналізу.
8. Оцінка нормальних, граничних та екстремальних режимів роботи електротехнічних комплексів у виділених контрольованих перетинах.
9. Оцінка інтегральних характеристик (показників) функціонування

еквівалентного генератора $E_{\text{ЕКВ}}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$ для i -го виділеного контрольованого перетину.

10. Оцінка рівня енергоефективності функціонування Microgrid в цілому.
11. За необхідності розробка та видача рекомендацій щодо оптимізації (зміни) параметрів, режимів та структури електротехнічного комплексу.
12. Підготовка узагальнених висновків.

Елементи Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

Мета Концепції – оптимізації параметрів, режимів та структури елементів Smart-технологій для енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

Елементи Концепції:

1. Загальна характеристика Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
2. Визначення основних напрямків розвитку Smart-мікрорайону інтелектуального міста з точки зору формування окремих типів Microgrid.
3. Визначення меж Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
4. Оцінка доцільності введення додаткових ступенів трансформації напруги (амплітуди та частоти), роботи системи на постійному струмі.
5. Оцінка доцільності використання пристроїв силової електроніки.
6. Формування загальної ієрархії Microgrid за секторами застосування.
7. Розгляд Microgrid i -го рівня.
8. Визначення напрямків застосування змінного та постійного струму.
9. Залучення нових Smart-технологій для забезпечення електроживлення конкретної групи споживачів / навантажень (одного споживача / навантаження).
10. Формування узагальнених макромоделей з використанням операцій декомпозиції та редукції.
11. Формування переліку блоків Microgrid i -го рівня, де потрібно здійснити уточнення режимів, параметрів чи структури системи (прив'язка структури Microgrid до місця, вибір об'єктів для модернізації).
12. Задання меж зміни параметрів; проведення аналітичних розрахунків

процесів; формування системи інтегральних характеристик (показників), які описують якість електроенергії та / чи якість електроживлення.

13. Вибір оптимальних параметрів чи режимів Microgrid і-го рівня.

14. Оцінка нормальних та / чи екстремальних режимів функціонування окремих Smart-технологій.

15. Оцінка показників (характеристик) енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

16. Оцінка екологічних та соціальних факторів функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

Основними технічними рішеннями з впровадження Smart Grid для побудови Smart City є [121]:

- створення єдиного диспетчерського центру керування енергосистемою з високим ступенем автоматизації, використанням «великих даних» (Big Data), можливостями безпосереднього керування компенсаторними потужностями та споживанням;

- скорочення радіуса енергозабезпечення шляхом застосування генераторів електроенергії малої та середньої потужності як основних та компенсаторних потужностей генерації електроенергії, зокрема газових міні-ТЕЦ у межах житлових комплексів та мікрорайонів, станцій спалювання біогазу та сміття і вітрогенераторів у передмістях;

- поширення використання сонячних батарей, зокрема, на дахах муніципальних будівель та багатоквартирних будинках;

- поширення використання локальних накопичувачів електроенергії, зокрема домашніх акумуляторів;

- поширення застосування систем «розумний будинок» / Microgrid з власними джерелами генерації та накопичення електроенергії;

- інтеграція систем енергозабезпечення громадського електротранспорту до єдиної мережі Smart Grid, використання електромобілів у екстрених та комунальних службах, у тому числі мобільних резервних джерел енергії;

- створення мережі енергоцентрів на базі станцій зарядки електромобілів

та паркінгів, пов'язаних напряму з локальними потужностями сонячної енергетики.

5.3. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завад на електромагнітні процеси в системах з перетворювачами електроенергії

Характеристика впровадження результатів дисертаційного дослідження наведена в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристика впровадження результатів дисертаційного дослідження

№ з/п	Назва проекту, організації	Що впроваджено
1	Проект USAID «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту у м. Чернігів», 2017)	Оцінка втрат внаслідок дії періодичних завад у електромережі тягових підстанцій Чернігівського тролейбусного управління із застосуванням програмно-алгоритмічного забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи при проведенні електротехнологічного обстеження, Управління транспорту, транспортної інфраструктури та зв'язку Чернігівської міської ради
2	ТОВ «Електросфера», м.Київ	Пакет програм, який дає змогу здійснювати розрахунки та аналіз характеристик електротехнічних комплексів, що містять електричні схеми з періодично змінюваними параметрами
3	ТОВ «Інтерпроект Гмбх», м.Київ	Пропозиції щодо підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення водоканалів, зокрема у віддалених населених пунктах, в умовах нестабільного енергопостачання та у разі використання додаткових джерел енергії, у тому числі сонячних та вітрогенераційних установок
4	Впровадження у навчальний процес Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського на кафедрі електропостачання	Розширення методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, аналітичні вирази для моделювання та аналізу періодичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, а також аналізу завад та інтегральних характеристик таких систем
5	Використання у науково-дослідній роботі кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського	Методологічне забезпечення розрахунку усталених режимів у системах з перетворювачами електроенергії. Програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів у разі дії періодичних завад. Методичне забезпечення здійснення експрес-аналізу у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) Smart-електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами генераторів та навантажень.

Як приклад результатів наведемо окремі розрахунки, виконані в рамках впровадження результатів дослідження для Чернігівського тролейбусного управління та ТОВ «Електросфера».

Для більш наочного моделювання роботи системи електроживлення Чернігівського тролейбусного управління під дією імпульсних періодичних завад, розглянуто випадок дії прямокутних періодичних імпульсів зі змінною полярністю та синусоїдальних завад, при цьому розглянуто дію імпульсів спотворень на перших двох періодах роботи генератора синусоїдальної напруги. Знайдемо значення струмів у навантаженні у разі активно-індуктивного навантаження.

Для дослідження впливу імпульсних завад на роботу навантаження будемо за допомогою генератора періодичних імпульсів подавати прямокутні завади змінної полярності в систему з синусоїдальною напругою.

Розглянемо випадок завади з прямокутною формою напруги $U(t)$ (рис. 5.2) та різними параметрами активного опору та індуктивності:

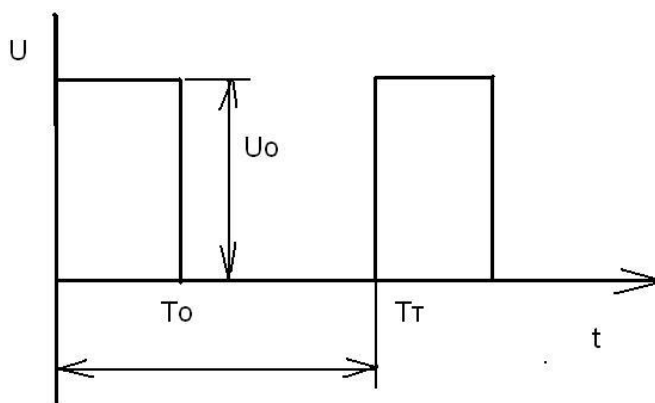


Рисунок 5.2 – Випадок завади з прямокутною формою напруги $U(t)$

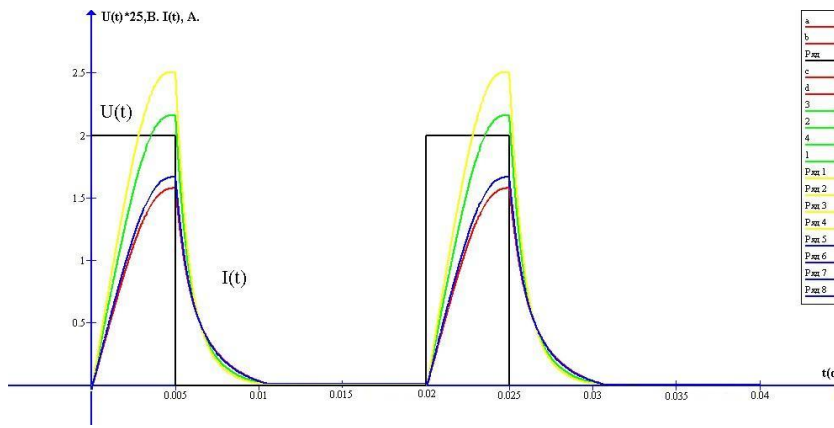


Рисунок 5.2 а

$$U_0=50, T_T = 0,02, T_0 = T_T / 4$$

Червоний - $R=30$ Ом,

$L=0,05$ Гн

Синій - $R=30$ Ом, $L=0,01$ Гн

Зелений - $R=20$ Ом, $L=0,05$ Гн

Жовтий - $R=20$ Ом, $L=0,01$ Гн

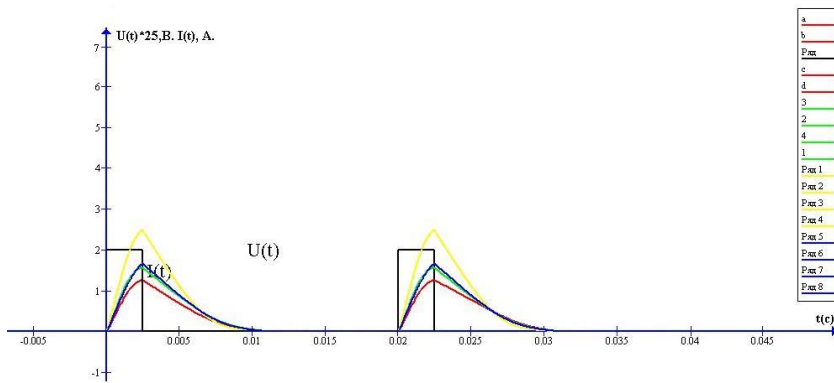


Рисунок 5.2 б

$$U_0=50, T_T = 0,02, T_0 = T_T / 8$$

Червоний - $R=30$ Ом,

$L=0,05$ Гн

Синій - $R=30$ Ом, $L=0,01$ Гн

Зелений - $R=20$ Ом, $L=0,05$ Гн

Жовтий - $R=20$ Ом, $L=0,01$ Гн

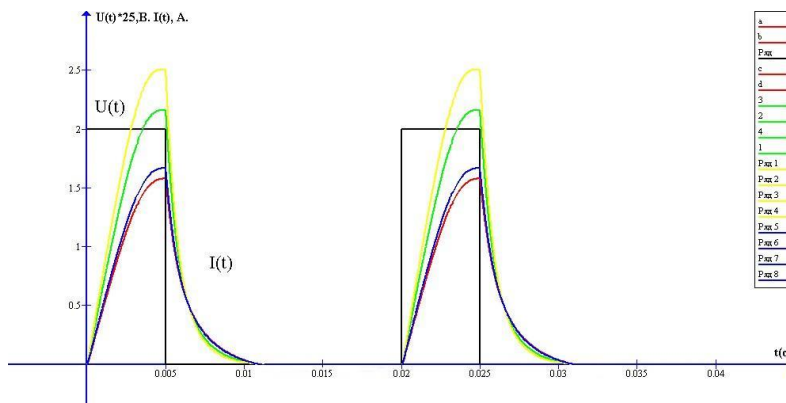


Рисунок 5.2 в

$$U_0=50, T_T = 0,2, T_0 = T_T / 4$$

Червоний = Синій - $R=30$ Ом, $L=0,05$ Гн, $L=0,01$ Гн

Зелений = Жовтий - $R=20$ Ом, $L=0,05$ Гн, $L=0,01$ Гн

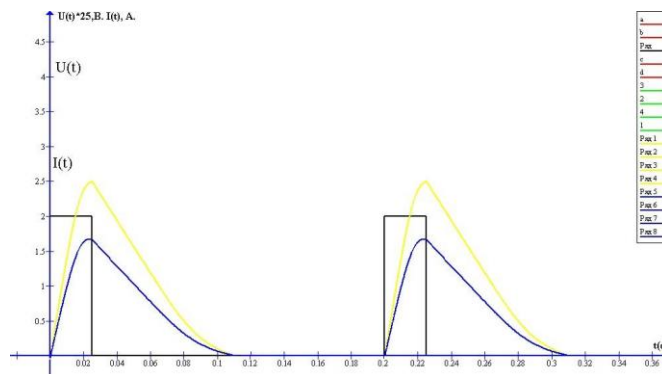


Рисунок 5.2 г

$$U_0=50, T_T = 0,2, T_0 = T_T / 8$$

Червоний = Синій - $R=30$ Ом, $L=0,05$ Гн, $L=0,01$ Гн

Зелений = Жовтий - $R=20$ Ом, $L=0,05$ Гн, $L=0,01$ Гн

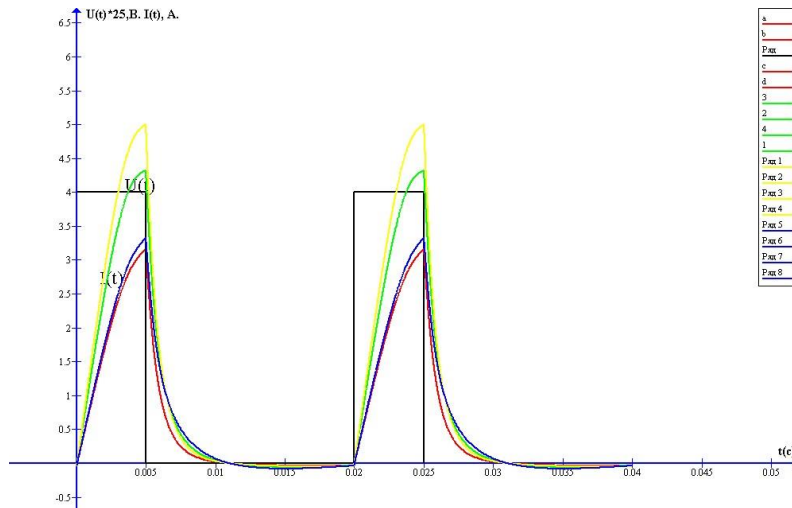


Рисунок 5.2 д

$U_0=100, T_T=0,02, T_0 = T_T /4$
 Червоний - $R =30 \text{ Ом}, L =0,05 \text{ Гн}$
 Синій - $R =30 \text{ Ом}, L =0,01 \text{ Гн}$
 Зелений - $R =20 \text{ Ом}, L =0,05 \text{ Гн}$
 Жовтий - $R =20 \text{ Ом}, L =0,01 \text{ Гн}$

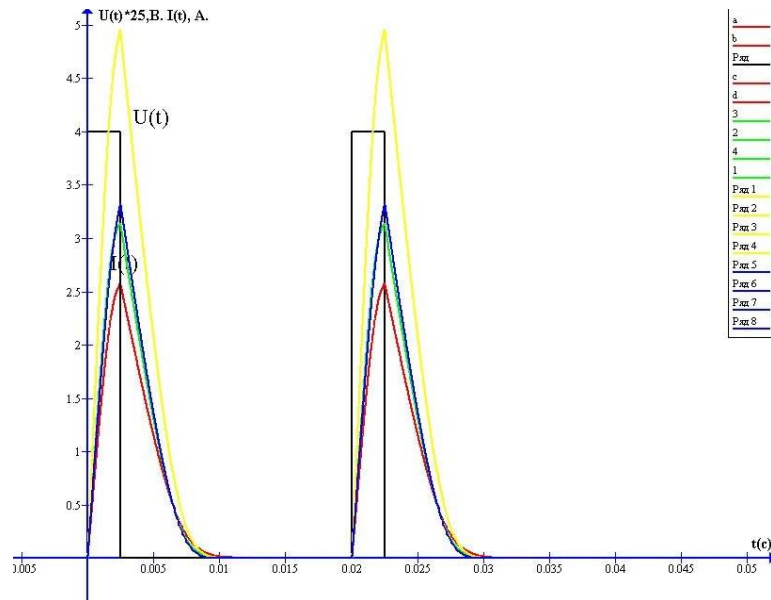


Рисунок 5.2 е

$U_0=100, T_T=0,02, T_0 = T_T /8$
 Червоний - $R=30 \text{ Ом}, L=0,05 \text{ Гн}$
 Синій - $R=30 \text{ Ом}, L=0,01 \text{ Гн}$
 Зелений - $R=20 \text{ Ом}, L=0,05 \text{ Гн}$
 Жовтий - $R=20 \text{ Ом}, L=0,01 \text{ Гн}$

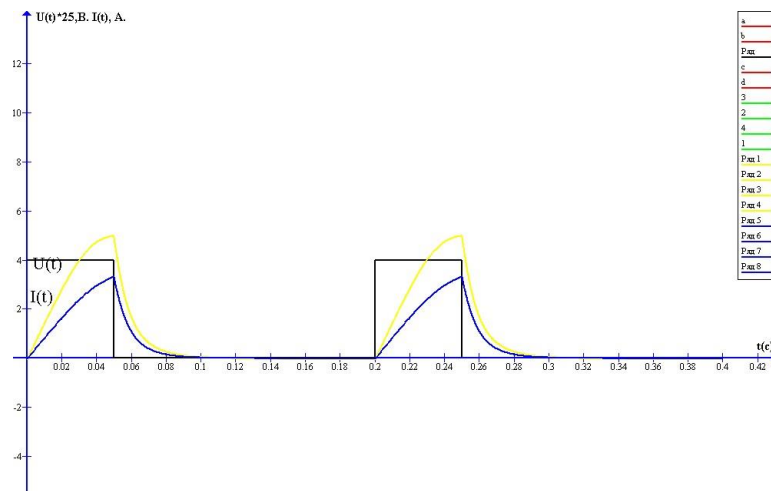


Рисунок 5.2 є

$U_0=100, T_T=0,2, T_0 = T_T /4$
 Червоний = Синій - $R=30 \text{ Ом}, L =0,05 \text{ Гн}, L =0,01 \text{ Гн}$
 Зелений = Жовтий - $R =20 \text{ Ом}, L =0,05 \text{ Гн}, L =0,01 \text{ Гн}$

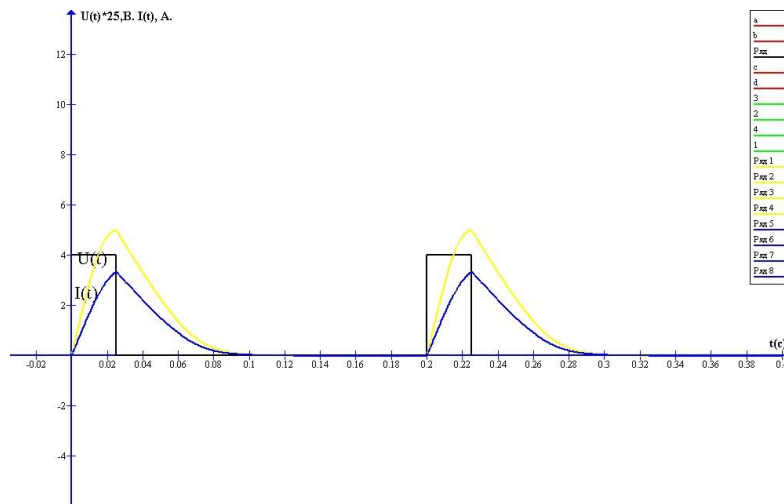


Рисунок 5.2 ж

Рисунок 5.3 – Дослідження впливу імпульсних завад на роботу навантаження

Розглянемо випадок розрахунку завади у вигляді синусоїдального сигналу, період якої вдвічі менше за період роботи схеми. Для прикладу використаємо значення $L=0,05$ Гн, $T_0=0,02$ с, $T_T=4T$, амплітуда напруги завади $U=20$ В, а активний опір (в омах) змінюється на кожному інтервалі T – в першому випадку спадає ($R_1=50, R_2=40, R_3=30, R_4=20$), графіки наведено на рис. 5.4, а у другому випадку – зростає ($R_1=20, R_2=30, R_3=40, R_4=50$), графіки наведено на рис. 5.5.

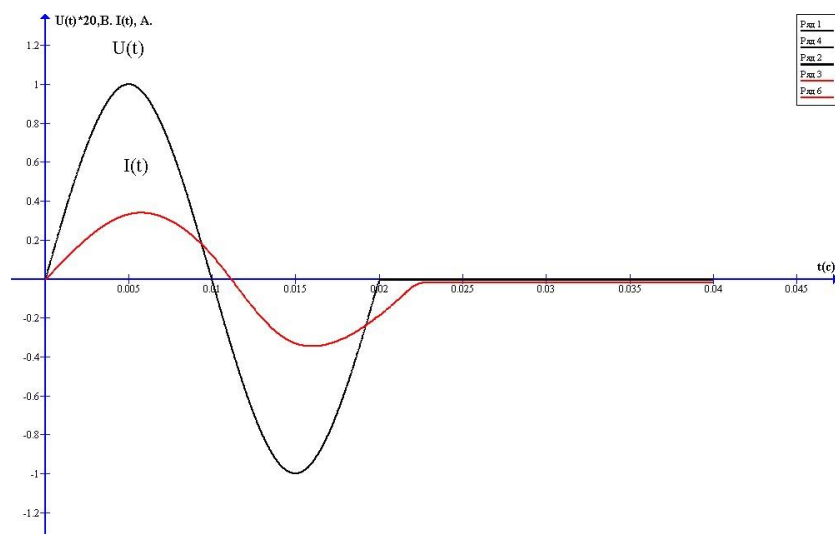


Рисунок 5.4 – Графік напруги та струму завади за зменшення активного опору

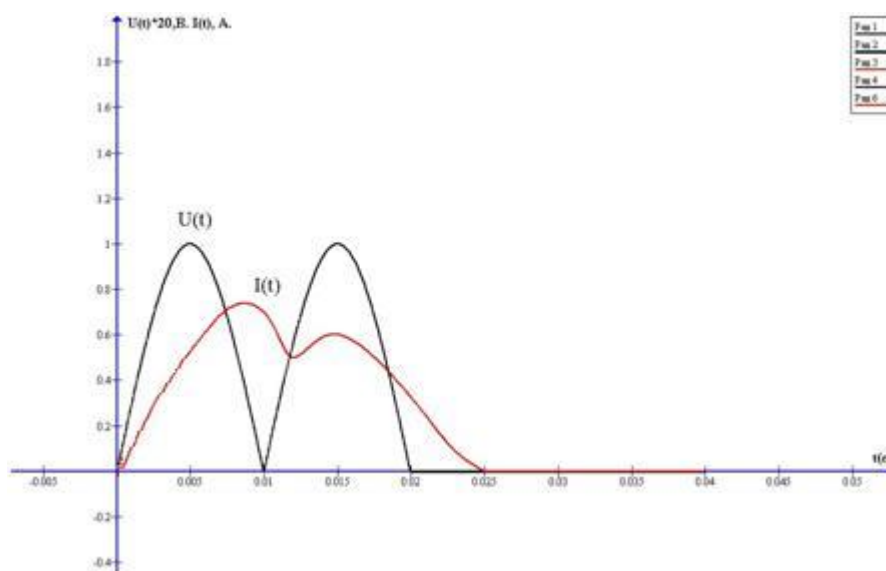


Рис. 5.5 – Графік напруги та струму завади за збільшення активного опору

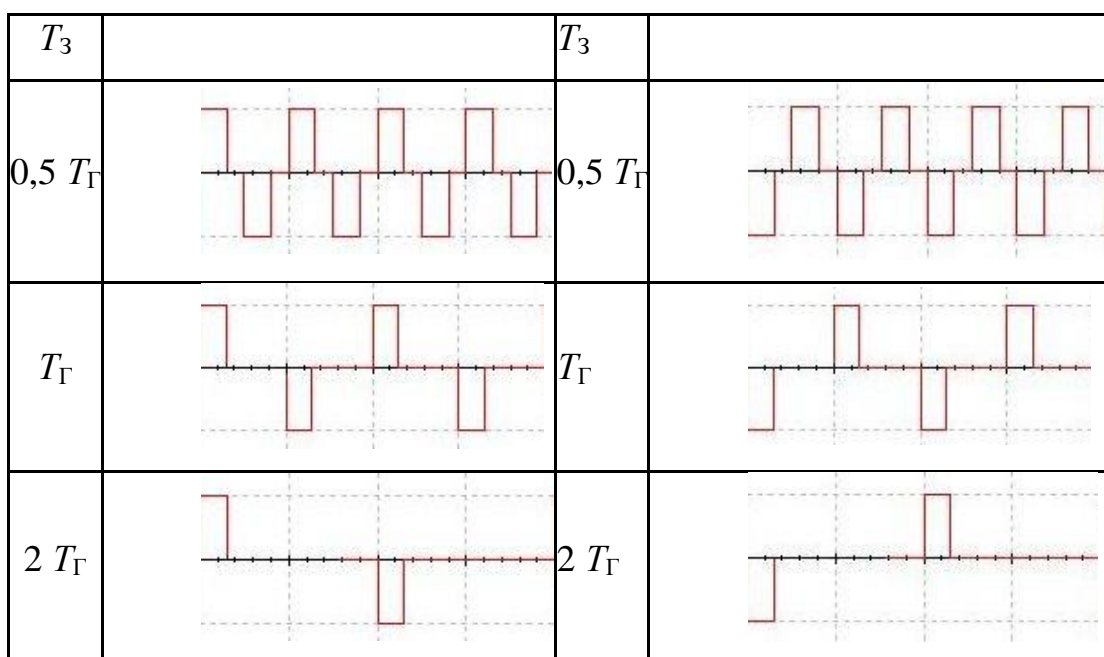
Щодо впровадження для ТОВ «Електросфера». Наведемо аналіз впливу імпульсних завад на роботу компенсатора реактивної потужності. За допомогою генератора синусоїдальної напруги мережі ($E_{\Gamma}(t)$) та генератора періодичних імпульсів завад ($E_3(t)$) будемо подавати живлення в систему та прямокутні завади змінної полярності. Для остаточного аналізу за допомогою методу накладання проаналізуємо зміни відносно системи без впливу імпульсів спотворень. Отже, будемо мати $E_{\Sigma}(t)$): $E_{\Sigma}(t) = E_{\Gamma}(t) + E_3(t)$.

Щоб визначити, як впливають періодичні прямокутні завади на роботу системи електроживлення, будемо змінювати параметри роботи генератора імпульсів завад ($E_3(t)$) та генератора живлення мережі ($E_{\Gamma}(t)$), а саме: фазу імпульсу завад (φ), тривалість імпульсу завад ($T_{\text{імп}}$), період роботи генератора завад (T_3) відносно періоду роботи генератора живлення (T_{Γ}), шпаркість (γ) та амплітуду імпульсу завад (U_3) відносно амплітуди синусоїдального генератора ($U_{\text{м}}$). Для визначення впливу завад на синусоїдальний генератор і подальшого порівняння результатів знайдемо струм на компенсаторі ($I_{\text{к}}$) без дії імпульсів завад. Зміна заданих параметрів впливає на миттєві та діючі значення робочих струмів та напруг як у навантаженні, так і в компенсаторі, що спотворює графіки їх навантажувальних та керувальних характеристик.

Розглянемо роботу системи у разі трьох сталих значень періоду роботи генератора завад $E_3(t)$ відносно періоду роботи генератора мережевої напруги $E_T(t)$: 1) $T_3 = 0,5T_T$; 2) $T_3 = T_T$; 3) $T_3 = 2T_T$ (див. табл. 5.3) та трьох сталих значень амплітуди імпульсів завад U_3 відносно амплітуди генератора живлення U_M : 1) $U_3 = U_M$; 2) $U_3 = 0,5U_M$; 3) $U_3 = 1,5U_M$. Будемо брати до уваги один період роботи генератора живлення і генератора завад.

На основі вимірних даних за різних значень амплітуди імпульсів спотворення та періоду роботи генератора спотворення побудуємо сімейства характеристик, за якими можна спостерігати зміну струму на компенсаторі реактивної потужності у разі зміни описаних вище параметрів. Такий аналіз покаже, який параметр має найбільший вплив на роботу системи електроживлення під дією прямокутних періодичних завад. Загалом отримані сімейства характеристик вказують на те, що струм на компенсаторі поступово збільшується за експоненціальним законом у разі збільшення амплітуди генератора завад та при збільшенні тривалості імпульсів завад. При подальшому збільшенні періоду роботи генератора завад його вплив на роботу системи нівелюється.

Таблиця 5.3 – Графіки періодичних прямокутних завад



За наведеними графіками (рис. 5.6) можна зробити висновок, що зі збільшенням тривалості імпульсу завад $T_{\text{имп}}$ пропорційно збільшується і діюче значення струму на компенсаторі. У разі збільшення періоду роботи генератора завад T_3 спостерігається тенденція до зменшення миттєвого значення струму на компенсаторі реактивної потужності. Зі збільшенням амплітуди імпульсів завад U_3 збільшуються і діючі значення струму на компенсаторі незалежно від тривалості імпульсу завад.

Можна зробити висновок, що залежність діючих струмів у компенсаторі має прямо пропорційний характер відносно тривалості імпульсів генератора завад $T_{\text{имп}}$ та відносно амплітуди імпульсів спотворень T_3 (за співпадіння фаз імпульсів завад та фази синусоїди живлення). Це можна пояснити збільшенням площі під графіком напруги завдяки накладанню графіка імпульсів завад на графік напруги живлення мережі.

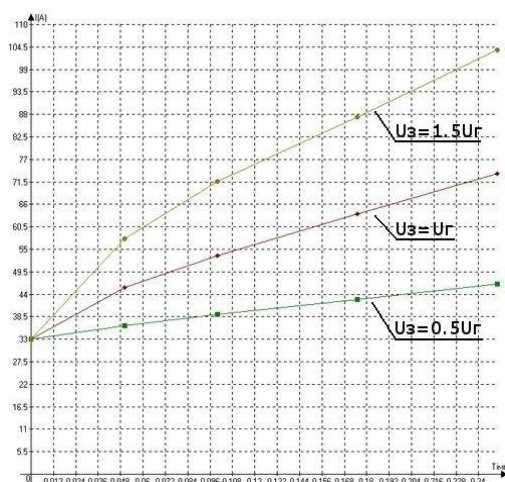
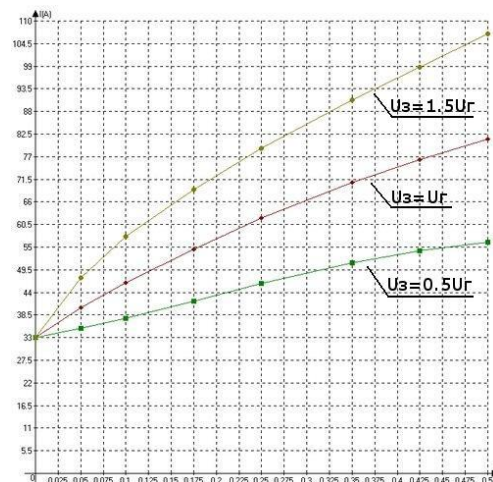
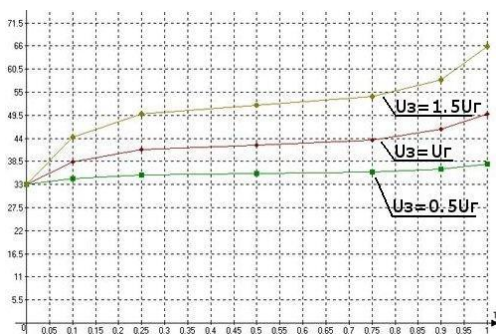
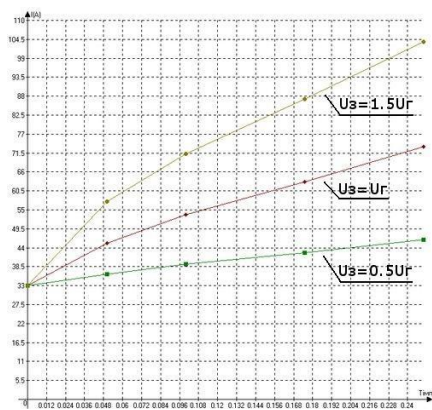
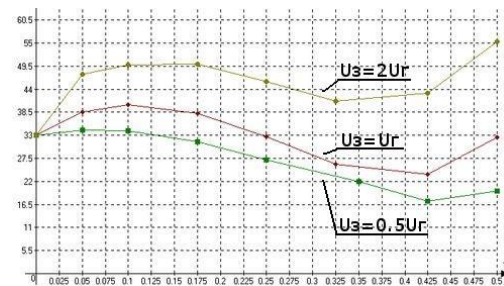
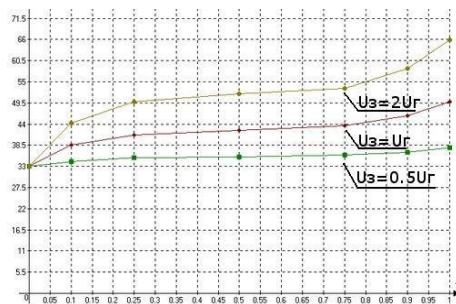
а) $T_3 = 0,5T_{\Gamma}$ б) $T_3 = T_{\Gamma}$ в) $T_3 = 2T_{\Gamma}$

Рисунок 5.6 – Залежності $I_K = f(T_{\text{имп}})$, синфазна робота генераторів

У разі зміни полярності імпульсів завад спостерігаються подібні зміни в роботі ЕТК, як було описано вище. Очевидна відмінність є тільки за однакового періоду роботи генератора $E_M(t)$ та генератора завад $E_3(t)$. У разі співпадіння фази імпульсів спотворення з синусоїдальною напругою живлення отримаємо найбільшу різницю значень струму, що на рис. 5.7 відображено відрізком з найбільшою різницею між графіками за значенням струму. В цілому режим роботи системи має незначні зміни відносно зміни полярності імпульсів завад і головні описані закономірності мають місце і у випадку зі зміною полярності роботи генератора імпульсів.

а) $T_3 = 0,5 T_\Gamma$ б) $T_3 = T_\Gamma$ в) $T_3 = 2 T_\Gamma$ Рисунок 5.7 – Залежності $I_k = f(T_{\text{имп}})$, протифазна робота генераторів

Отримані графіки показують збільшення пікового імпульсного значення струму та значне спотворення графіка напруги живлення. Цього ефекту можна позбутися введення в систему фільтруючих пристроїв, які будуть фільтрувати високочастотну складову напруги живлення. Також увагу слід приділити роботі системи при рівних періодах генератора завад та генератора живлення. Значення

струму в такому режимі може мати найбільш протилежне значення через спів падіння або не спів падіння фаз роботи генераторів.

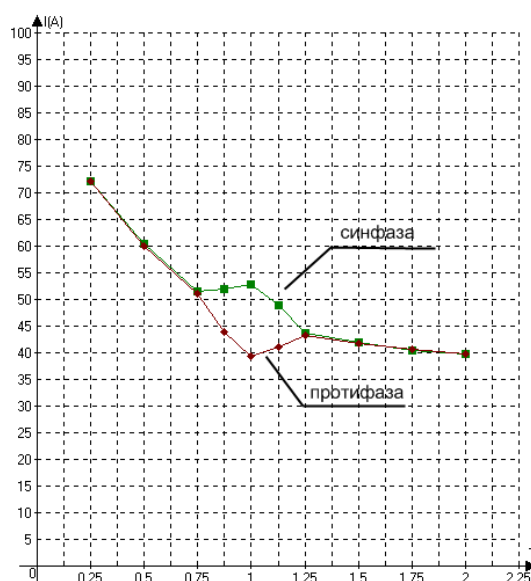


Рисунок 5.8 – Залежність діючого значення струму на компенсаторі від періоду роботи генератора завад

Матеріали дисертаційної роботи можуть бути застосовані для забезпечення сталого розвитку населених пунктів та територій, зокрема реалізації заходів за впровадженням Цілей сталого розвитку ООН, зокрема цілей №7 «Відновлювана енергетика», №9 «Інновації та інфраструктура», №11 «Сталий розвиток міст та спільнот», №13 «Боротьба зі зміною клімату». Серед найбільш перспективних напрямків, де може бути застосовано проведені дослідження в рамках напрямків діяльності Міністерства розвитку громад та територій України, є підвищення енергоефективності будівель, житлових та господарських комплексів, мікрорайонів та окремих населених пунктів шляхом відповідної реорганізації електротехнічних комплексів децентралізованого електропостачання на основі підходу Microgrid, із впровадженням технологій енергозбереження, відновлювальної енергетики, збереження та накопичення електроенергії, що може бути реалізовано, зокрема, через відповідні проекти та програми розвитку громад та регіонів. У рамках напрямків діяльності Міністерства розвитку громад та територій України це відповідає як питанням

сталого розвитку населених пунктів, а також територіальних громад, так і розвитку Фонду енергоефективності (який діє при Мінрегіоні), зокрема, як інформаційно-аналітичні матеріали для територіальних громад у сфері комплексного підходу до підвищення енергоефективності.

Висновки до розділу 5

Сформульовано основні задачі аналізу та розрахунку електромагнітних процесів у СПЕЕ, використання для здійснення таких досліджень розширення методу окремих складових та програмного середовища C++ Builder для забезпечення автоматизації аналізу та розрахунків таких систем шляхом розробки та використання програмного модуля. Наведено особливості використання програмного модуля для різних типів сигналу генератора. Запропонований підхід є простим для практичного використання та має великі можливості розширення. Сформульовані задачі та алгоритми у [3–5] реалізовано у вигляді програмного модуля *MOSG-1.0*.

1. Розглянуто можливості застосування алгоритму розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами на основі операторного методу для автоматизації здійснення відповідних розрахунків шляхом розроблення відповідних математичних моделей у програмних комплексах та створення окремого пакета програм для здійснення відповідних розрахунків, що дає змогу оцінити можливості застосування запропонованих аналітичних виразів.

2. Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом застосування запропонованих аналітичних виразів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати відповідні оцінки енергоефективності функціонування Microgrid.

3. Запропоновано концепцію формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста шляхом розроблення алгоритму здійснення відповідних досліджень і

оцінок та формування мережі Microgrid кількох рівнів ієрархії, що дає змогу здійснювати вибір оптимальних параметрів Microgrid та оцінку загальних показників енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

4. Формування локальної енергосистеми за концепцією Smart Grid як енергетичної складової Smart City потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії суб'єктів господарювання та фінансових розрахунків. Враховуючи, що основною заінтересованою стороною створення Smart Grid є органи місцевого самоврядування, впровадження таких систем можуть ефективно здійснювати локальні енергетичні компанії, що працюють з кінцевими непромисловими споживачами електроенергії і діяльність яких визначається та контролюється органами місцевого самоврядування через формування та реалізацію місцевої (локальної) енергетичної політики.

5. Результати дисертаційних досліджень впроваджено в Чернігівському тролейбусному управлінні (м. Чернігів), ТОВ «Електросфера» (м.Київ), ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ), а також у навчальному процесі Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язана актуальна для електротехнічних комплексів науково-прикладна задача розвитку методу окремих складових для аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних комплексів у разі дії складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень. Отримані в дисертаційній роботі результати становлять суттєвий внесок у подальший розвиток аналізу електромагнітних процесів у електротехнічних Smart-комплексах аналітичними методами.

1. На основі аналізу тенденцій розширення функціональних можливостей електротехнічних комплексів у рамках окремих територій (поселень, мікрорайонів, господарських комплексів) з використанням Smart-технологій виявлено основні напрямки впровадження електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення як базових елементів кластерної моделі системи електроживлення з урахуванням можливостей автономної або напівавтономної роботи її окремих сегментів, а також підвищення енергоефективності та стійкості в різних умовах, що дає змогу сформулювати комплексне бачення інтеграції процесів розвитку Microgrid та загальної концепції Smart City.

2. За результатами аналізу основних принципів моделювання електротехнічних комплексів шляхом виокремлення еквівалентних генераторів, перетворювачів електроенергії та навантажень, що дає змогу врахувати співвідношення їхніх періодів роботи між собою та відповідно до загального періоду роботи електротехнічного комплексу, виявлено особливості роботи електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами еквівалентних генераторів та еквівалентних навантажень, що дало змогу сформувати моделі усталених режимів у ЕТК-Smart за допомогою аналітичних методів.

3. Побудовано зображення складних періодичних функцій напруги для модульованих сигналів за різних видів модуляції з використанням методів

накладання та згортки нескінченних аналітичних виразів в операторній області, що дало змогу сформувавши аналітичні вирази для розрахунку струмів усталених режимів для складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень. Розроблену методологію аналізу доцільно застосовувати у разі аналізу груп навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінки можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень) за реалізації механізмів керування попитом (DSM), а також оцінки рівнів узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами, аналізу впливу завад, коли період дії основного сигналу та завади не співпадає.

4. Побудовано аналітичні вирази оригіналів струмів усталених режимів для складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень, що дало змогу сформувавши математичну модель для здійснення розрахунків та аналізу електромагнітних процесів усталених режимів у ЕТК-Smart.

5. На основі аналізу електромагнітних процесів усталених режимів у ЕТК-Smart здійснено оцінку впливу періодичних кондуктивних завад на усталені режими в цих електротехнічних комплексах, що дало змогу підвищити ефективність їхньої роботи та отримати аналітичні вирази протікання електромагнітних процесів у разі дії двох еквівалентних генераторів $E_{\text{EKB1}}(t)$ та $E_{\text{EKB2}}(t)$ з некрatними періодами роботи.

6. Розроблене програмне забезпечення дало змогу виконати впровадження результатів аналізу нормальних усталених режимів ЕТК-Smart, а також спотворених режимів за наявності періодичних кондуктивних завад у концепції формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста. Побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому разі забезпечуватиметься

єдиний методологічний підхід до розгляду локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі.

7. Результат досліджень впроваджено у Чернігівському тролейбусному управлінні (м. Чернігів), ТОВ «Електросфера» (м.Київ), ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ), а також у навчальному процесі Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

8. Результати дисертаційної роботи рекомендовано для використання організаціям та підприємствам, іншим науковим та промисловим установам, які займаються аналізом та оптимізацією електромагнітних процесів у електротехнічних комплексах децентралізованого електропостачання.

9. Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується використанням коректних методів досліджень, узгодженням розрахунків та результатів експериментів, апробацією основних положень та отриманих результатів, представлених на наукових конференціях і семінарах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160-2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальноного призначення.
2. СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933- 55:2011 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення.
3. Автоматизированное проектирование силовых электронных силовых электронных схем / Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Андриенко П.Д., Еременко М.А. – К.: Техніка, 1988. – 132 с.
4. Андрейченко В.П., Донец А.В., Герасименко В.А. Повышение энергоэффективности на городском электрическом транспорте // Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник, №107. – С. 412–417.
5. Аррилага Д., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
6. Архангельский В.Я. Программирование в C++ Builder. – М.: Бином. – 2003. – 528 с.
7. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
8. Баланс энергий в электрических цепях / Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 309 с.
9. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Математическое моделирование систем преобразования электрической энергии для микросетей // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 2 (36). – С. 43–51.
10. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. – М.: Советское радио, 1969. – 432 с.

11. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Гардарики. 2007. – 701 с.
12. Биконя О.С. Формування інтелектуальної енергосистеми України. Економіка і прогнозування. – К., 2014. – №1. – С.87-96.
13. Бойко В.С., Видолоб Ю.Ф., Курило І.А. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Том 2. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2009. – 272 с.
14. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – К.: НГТУ. – 2004. – 214 с.
15. Вакуленко В.М., Орлатий М.К. Управління сучасним містом. К. : НАДУ, 2008. - 632 с.
16. Вентильные преобразователи переменной структуры / Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Денисюк С.П. и др. – К.: Наук. Думка, 1989. – 336 с.
17. Визначення необхідних умов і алгоритмів врахування ВЕС та СЕС при налаштуванні протиаварійних автоматичних пристроїв, призначених для запобігання порушенню стійкості (АЗПС) у перетинах ОЕС України на режим роботи яких вони мають вплив. Методичні рекомендації / Стандарт підприємства (Проект). – ДП НЕК «Укренерго». – https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/02/Metodychni-rekomendatsiyi_AZPS.pdf
18. Використання технологій Smart Grid для підвищення ефективності електропостачання споживачів / Мороз О.М., Черемісін М.М., Савченко О.А., С.А. Попадченко, Дюбко С.В.// Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. С.П. № 3.
19. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
20. Вольский С.И., Сыроежкин Е.В., Чуев Д.В. Инструкция по CASPOS. – М.: Издательство МАИ, 2003. – 120с.
21. Горбачев М.Н. Аналитический метод нахождения негармонических решений в некоторых задачах теории радиотехнических и электронных цепей //

Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2003. – № 1. – С. 122–125.

22. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Оптимізація роботи електрогенеруючих установок при дії джерела імпульсних завад // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К., 2016. – №4. – С.72–80.

23. Грин Д., Кнут Д. Математические методы анализа алгоритмов. Перевод с английского Б.Б. Походзея. – М.: Мир, 1987. – 120 с.

24. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 7–21.

25. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Колесник П.С. «Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією». Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. Вип. № 2, – 2011. – С.30–36.

26. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Мельничук Г.В. Системи силової електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink. Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 72 с.

27. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Аналіз процесів у перетворювачах електроенергії з циклічно змінюваними параметрами та врахуванням тривалості технологічного процесу // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Ч.2. – 2006. – 107–112.

28. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2003. – № 3(6). – С. 102–108.

29. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у комплексах з циклічно змінюваними параметрами // Електроніка та зв'язок. – 2005. – № 26. – С. 29 – 36.

30. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Формування системи рівнянь змінних стану для розрахунку процесів у електричних комплексах з циклічно змінними режимами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – № 3(12). – С. 132–137.

31. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Аналіз інтегральних характеристик систем електроживлення з циклічно змінними параметрами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – №28. – С.30–35.

32. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Розрахунок електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електричної енергії для технологічних систем з циклічно змінюваними параметрами // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – №25. – С.140–144.

33. Денисюк С.П., Радиш І.П. Аналіз складових втрат електроенергії в системах електроживлення з циклічно змінюваними параметрами елементів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2002. – № 3(3). – С. 39–43.

34. Дерев'янка Д.Г. Оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів в локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації: дис. канд. техн. наук: 05.09.03/ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ. – 2016. – 177 с.

35. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высш. шк., 1965. – 466 с.

36. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей. Москва: Машиностроение, 2012.

37. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы энергоснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // Електротехніка і електромеханіка. – №1. – 2013. С.41-49.

38. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Енергоефективність систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 272 с.

39. Жуйков В.Я, Денисюк С.П. Енергетичні процеси в електричних колах

з ключовими елементами. – К. Вид. ТЕКСТ. – 2010. – 264 с.

40. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Моделювання систем з перетворювачами електроенергії з циклічно-змінюваними параметрами. – К.: ТОВ «Наш формат», 2018. – 165 с.

41. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Розвиток методу окремих складових для розрахунку складних електронних систем // Техн.електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електроніки», 2008. – Ч.3, – С.3–8.

42. Жуйков В.Я., Сучик В.Е. Анализ процессов в преобразователях с некрatным соотношением периодов работы ключей и внешних воздействий // Повышение качества электрической энергии. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 126–131.

43. Заєць Н.А., Роговик А.В., Власенко Л.О. Сценарно-цільовий аналіз електротехнічного комплексу харчових виробництв // Енергетика і автоматика. – 2019. – № 2. – С. 58–73.

44. Закон України «Про ринок електричної енергії»: №2019-VIII, редакція від 01.01.2021.

45. Згуровський М.З., Праховник А.В. Сталий розвиток суспільства та енергетики // Енергетика. Екологія. Людина / Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. 2009. С.8-13.

46. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

47. Зотин О.В. В преддверии возрождения постоянного тока // М. Силовая электроника. – №4. – 2013. – С.15-20.

48. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии. Электричество. 1992. №11. С. 13–19.

49. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: Навчальний посібник / М.І. Стаднік, А.А. Видмиш, А.А. Штуць, М.А. Колісник. – Вінниця: ТОВ «Твори», 2020. – 332 с.

50. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та

керування режимами електроенергетичних мереж // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т. 2: Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 82-94.

51. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силовой електроніки та методи їх аналізу. – К.: Вид. «Текст», 2006. – 488 с.

52. Кириленко О.В., Петергеря Ю.С., Терещенко Т.О., Жуйков В.Я. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах. – К.: Аверс, 2005. – С. 17–28.

53. Климов П.Л. Влияние распределенной генерации с ветроэнергетическими установками на распределительные сети. Вестник ИрГТУ. – 2017. – № 2(21). – С.97–105.

54. Клиначёв Н. В. Моделирующая программа Jigreйн: Теория, программа, руководство, модели. – Челябинск. – 2007-2008. – 312 с.

55. Коноплев И.А. Квазианалитическая методика расчета переходных процессов // Техн. электродинамика, 2000. – С.127–130.

56. Коротеев И.Е. Расчет квазиустановившихся процессов в преобразователях с нестационарной нагрузкой // Техн. электродинаміка. Темат. вып. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2000. – Ч. 7. – С. 41–44.

57. Коротеев И.Е., Щесняк П. Расчет устойчивости преобразователей постоянного тока на основе метода усреднения переменных состояния // Техн.электродинамика. Темат.вып. – 2005. – С.76–79.

58. Кривоносов В.Є. Розвиток та підвищення ефективності функціонування систем діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів. – Автореф. дисертації докт. техн. наук Спеціальність 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Харків, 2019. – 40 с.

59. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие. Новосибирск: АСТ. – 2003. – 283 с.

60. Кучеров Ю.Н., Утц С.А., Ярош Д.Н. Современные тенденции развития электроснабжения мегаполисов с целью повышения управляемости режимов

работы энергосистемы // Электричество. – №6. – 2017. – С.4-15.

61. Лазуренко А.П., Лисичкина Д.С, Черкашина Г.И. Новый подход к классификации потребителей электрической энергии // Світлотехніка та електроенергетика. – №. 1, – 2008. – С. 76–80.

62. Липецкая М.С., Римских Е.А. Smart City: Эволюция умных городов. – Материалы IV Международной конференции «Цифровой бренд-менеджмент территорий: глобальный и локальный аспекты», 29–30 ноября 2018, Томск. – С. 126–131.

63. Ліщина В., Степанюк Д., Вознюк А., Ілюшик О. Розумні міста та їх перспективи у 21 столітті // Modern engineering and innovative technologies. Issue 7 / Part 3, March 2019. – Р. 54–60.

64. Лукомський Д.В. Облачное будущее для солнечных электростанций в Украине. Економічна правда. 31.10.2019. URL: https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/10/31_/653184/ (дата звернення 20.02.2020).

65. Лыщинова Ю.В. Эволюция концепции «умный город»: от технократизма к антропоцентризму и «умному обществу» // Финансовая экономика. – №11. – 2019. – С.794-796.

66. Макконнел Д. Основы современных алгоритмов. 2-е дополненное издание. – М.: Техносфера, 2004. – 386 с.

67. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи.: – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.

68. Мельничук Г.В. Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 4. – С.76-86

69. Мельничук Г.В. Особливості моделювання систем електропостачання з розосередженою генерацією // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Спеціальний випуск. Ч.2. – С.191–197.

70. Мельничук Г.В., Щербань К.Ю., Прокопенко І.Д. Аналіз впливу завод на характер протікання енергетичних процесів у системах з перетворювачами

електроенергії // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Спеціальний випуск. – С.145–152.

71. Мерабишвили П.Ф., Ярошенко Е.М. Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями. – Кишинев: Штиинца, 1980. – 274 с.

72. Микрогриды – энергетика, экономика, экология и ИТС в умных городах / В.П. Куприяновский, Ф.Ю. Фокин, С.А. Буланча, Ю.В. Куприяновская, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162. – Vol. 4, No. 4, 2016. – P. 10–18.

73. Мікромережі: світовий досвід та можливості для України. – <http://energycooperative.org.ua/2017/09/28/>

74. Міназова К.О., Афанасьєва О.А. Шляхи оцінки стану електромагнітної сумісності в системах з перетворювачами // Праці ІЕД НАНУ. Спец. випуск. – 2007. – С.120-123.

75. Обухов С.Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии – Автор. диссертации докт. техн. наук. Специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». – Томск, 2013. – 41 с.

76. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. – М.: Мир, 1975. – 560 с.

77. Охріменко В.М. Споживачі електричної енергії. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.

78. Павлов В.Б., Новський В.О., Попов В.А., Палачов С.О. Особливості застосування зарядних станцій електромобілів у міських електричних мережах // Техн. електродинаміка. – № 6.– 2018. – С.77-80.

79. Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями. – Автореф. дисертації докт. техн. наук. Спеціальність: 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Дніпро, 2019. – 36 с.

80. Петров А.А. методы и средства повышения качества электроэнергии в

системе метрополитена. – Автореф. диссертации канд. техн. наук. Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» – Новосибирск, 2019. – 20 с.

81. Праховник А.В., Попов В.А., Ярмолук Е.С., Кокорина М.Т. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – №2. – С. 7-14.

82. Рачицький В.С., Денисюк С.П. Перспективні архітектури Microgrid та особливості їх застосування // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, 2013.

83. Рехлин Т. Краткая история электричества, или почему «умные дома» питаются постоянным током // Компоненты и технологии. – 2015. – № 3. – С. 84–86.

84. Риндгланд Д. Сценарное планирование для разработки бизнес-стратегии: Пер. с англ. – М.: ООО «ИД «Вильямс», 2008. – 560 с.

85. «Розумним» містам потрібні «розумні» мережі. Новое время. 20.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/so-skorostyu-sveta/rozumnim-mistam-potribni-rozumni-merezhi-50060324.html> (дата звернення 18 лютого 2020 р.)

86. Руденко В.С., Жуйков В.Я., Коротеев И.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. – К.: Техніка, 1980. –136 с.

87. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вищ. школа, 1983. –431с.

88. Саблін О.І., Босий Д.О., Кебал І. Ю., Мямлін С.С. Оптимізація енергообмінних режимів у системах тягового електропостачання під час застосування накопичувачів // Зб. мат. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації». Кременчук, 12-13 квітня 2018. – С.64-65.

89. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Расчет электрических нагрузок в системах электроснабжения АПК: Метод. указания. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 54 с.

90. Самчелеев Ю.П., Скурятин Ю.В. Исследование электромагнитных процессов в преобразователях с принудительным выключением вентелей // Техн.

електродинаміка, 2000. – С 76-78.

91. Сборник задач по математике для вузов. Специальные разделы математического анализа. – М.: Наука, 1981. – 368 с.

92. Сиченко В.Г. Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 12 (1121). – С. 364–368.

93. Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І. Енергетика тягових мереж. – Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.

94. Сиченко В. Г., Саєнко Ю.Л., Босий Д.О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. – Дніпропетровськ: Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.

95. Смольников Л.П., Бычков Ю.А. Расчет кусочно-линейных систем. – Л.: Энергия, 1972. – 160 с.

96. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці – Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. – 332 с.

97. Стенников В.А., Воропай Н.И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция. – http://www.energystrategy.ru/projects/energy_21.htm

98. Стогній Б.С., Кириленко О.В, Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка, № 6, – 2010. – С. 44-50,

99. Стогній Б.С., Кириленко О.В, Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні // Техн. електродинаміка, №5, – 2012. – С. 52–67,

100. Сучик В.Е., Косенков И.Е. Аналитический расчет установившегося режима в преобразователях с большой кратностью частот внешнего воздействия и коммутации вентилей // Техн. електродинаміка. – 1987. – № 6. – С. 62 – 68.

101. Танкевич С.Е., Блинов И.В., Денисюк С.П. и др. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы. Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2014. – 408

с.

102. Технологии умных городов. Доклад / Руководитель проекта М.С. Липецкая. – СПб.: Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад», 2017. – 110 с.

103. Типс Б., Тафт Дж. Концепция Cisco Smart Grid: Решения по автоматизации подстанций для диспетчерских служб. – Корпорация Cisco. – 2010. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf

104. Толстов Ю.Г. Состояние и перспективы развития вентильной преобразовательной техники // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 4. – С. 354-365.

105. Черных И.В., Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 252 с.

106. Шаповал І.А. Наукові основи створення комплексів генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення. – Автореф. дис. докт. техн. наук. Спеціальність: 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Дніпро, 2019. – 36 с.

107. Шачнев О.Я. Обеспечение эффективного функционирования электротехнических комплексов промышленных производств с резкопеременными нагрузками. Автореф. дис. канд. техн. наук. Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Липецк, 2018. – 20 с.

108. Шидловська Н.А. Аналіз нелінійних електричних кіл методом малого параметру. – К.: Євроіндекс, 1999. – 192 с.

109. Шидловська Н.А. Нелінійні кола з тепловими втратами. – К.: Наук. думка, 2002. – 160 с.

110. Шидловський А.К., Кириленко О.В., Жуйков В.Я. Оцінка стану та перспективи розвитку методів аналізу електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 1. – С. 3–16.

111. Шипилло В.П. Операторно-рекуррентный анализ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 254 с.
112. Энергоэффективный мегаполис – Smart City «Новая Москва» / Под ред. В.В. Бушуева, П.А. Ливинского. – М.: ИД «Энергия», 2015. – 76 с.
113. A Multi-Year Plan for Research, Development, and Prototype Testing of Standard Modular Hydropower Technology // Brennan T. Smith Adam Witt Kevin M. Stewart Kyutae Lee Scott DeNeale Mark Bevelhimer et al. February 2017 Oak Ridge National Laboratory.
114. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2011. – Vol. 59, – No. 4. – P. 455-473.
115. Blaabjerg F., Chen Z., Kjaer S.B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems // IEEE transactions on power electronics. – 2004. – № 5. P. 1184-1194.
116. Blaabjerg, F., Ma, K., Yang, Y. Power Electronics – The Key Technology for Renewable Energy Systems // 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). – April 26, 2017.
117. Blaabjerg F., Blaabjerg F., Yang Y., Ma K., Wang X. Power electronics - the key technology for renewable energy system integration. Conference: 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). November 2015. DOI: 10.1109/ICRERA.2015.7418680
118. Burr Michael T. Reliability demands drive automation investments // Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department. – Nov. 1, 2003.
119. Citron R. Smart City Tracker 1q18: Global Smart City Projects by World Region, Market Segment, Technology, and Application. – Navigant Consulting, Incorporated, 2018. – 29 p.
120. Datta A. Three big challenges for smart cities and how to solve them. – The Conversation, 2016. June 9. URL: <https://theconversation.com./three-big-challenges-for-smart-cities-and-how-to-solve-them-59192>.

121. Denysiuk S., Melnychuk H. Decentralization of city energy supply systems in the conditions of technological transformations and formation of intellectual cities (smart city). Scientific foundations of modern engineering. Monograph. Boston (USA), 2020. – P.181-204.
122. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2016. – №4(46). – С.7–17.
123. EU – More Microgrids – Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids – European Research Project.
124. Flick T., Morehouse J. Securing the Smart Grid: Next Generation Power Grid Security: Syngress. 2011. – 320 p.
125. Guzinski J., Adamowicz M., Kaminski J. Infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych // *Automatyka. Elektryka. Zakłocenia*. – 2014. – N 1. – P. 74-83.
126. Hansen K., Breyer C., Lund H., «Status and perspectives on 100% renewable energy systems». *Energy*, 2019. – P. 471-480.
127. Hopkins D.C., Safiuddin M. Power electronics in a smart-grid distribution system. APEC – 10. 2010. Palm Springs, CA. – 83 p.
128. How much electricity does a home use? OVO Foundation. URL: <https://www.ovoenergy.com/guides/energy-guides/how-much-electricity-does-a-home-use.html> (дата звернення 10.03.2020).
129. IoT for smart cities. Transforming smart cities into future cities, EY, 2018 – <https://hub.kyivstar.ua/news/teoriya-reshenij-umnogo-goroda-i-vozmozhnosti-ee-realizaczii-na-baze-edinoj-municipalnoj-platformy/>
130. Lasseter R.H. Smart Distribution: Coupled Microgrids // *Proceedings of the IEEE*. July 2011. 99(6). – P.1074-1082.
131. Lasseter R.H., Piagi P. Microgrid: A Conceptual Solution. PESC'04 Aachen, Germany 20-25 June 2004
132. Lishchyna V., Stepaniuk D., Vozniuk A., Iliushyk O. Smart cities and their

perspectives in the 21st century // International periodic scientific journal. Karlsruhe. Issue №7. Part 3. 2019. – P.54-60.

133. Melnychuk H. Features of development of Smart Grid networks in communities, modeling methods and challenges in the implementation of intelligent power supply systems. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VIII (30), Issue: 244, 2020 Dec. Budapest. – P. 63-65.

134. Melnichuk H. Smart grid networks in communities: general approaches and calculation methods for simulation. Vol. 1, No 58 (2020). – Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – P.62-65

135. Microgrids – An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects by Nikos Hatziargyriou, Hiroshi Asano, Reza Iravani, and Chris Marnay // IEEE Power & Energy magazine July/August 2007.

136. Pournaras E., Jung S., Yadhunathan S., Zhang H., Fang X. «Socio-technical smart grid optimization via decentralized charge control of electric vehicles» Appl. Soft Comput. J., vol. 82. 2019. – P. 105573

137. Pranab K.R., Weaver J.E., Weber E.M., Dalton L., LeDoux T.M., Rose A.N. Electricity consumption patterns within cities: application of a data-driven settlement characterization method // International Journal of Digital Earth. № 13, 2020 – Issue 1: Patterns and Processes of Global Human Settlement Development and Dynamics. P.119-135. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2018.1556355> (дата звернення 16 лютого 2020 р.).

138. P2-Prof_Frede Blaabjerg : Power electronics – the key technology for grid integration / <http://file.cpss.org.cn/upload/2e507efd-47ac-43e7-ac5d-9b392b97341d/files>

139. Reilly J., Joos G. Microgrid controller standards for integration and interoperability. CIRED Workshop. Ljubljana. 7-8 June 2018.

140. Redenex Report «Macro possibilities of microgeneration». – <http://smartenergysummit.ru/en/novosti/microgrid>

141. Salman S. «Smart Grid infrastructure». Networked Control Systems. 2017. – P. 315-349.

142. Sanders D., Hart A., Ravishankar M., Brunert J. An analysis of electricity system flexibility for Great Britain. Imperial College London, 2016. – 103 p.
143. Smart Cities: An Overview of the Technology Trends Driving Smart Cities // IEEE [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: https://www.ieee.org/publications_standards/publications/periodicals/ieee-smart-cities-trend-paper-2017.pdf Electricity system development: a focus on smart grids. – United Nations Economic Commission for Europe. – Режим доступа: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/eneff/eneff_h.news/Smart.Grids.Overview.pdf
144. Smart cities: Public Safety in the Digital Age. – IBM. URL: https://govloop.com/blos/4001-5000/4144-Public_Safety_Digital_Age.pdf (дата звернення 10.03.2020).
145. Smart cities: Ranking of European medium-sized cities. – Vienna: Vienna University of Technology, 2007. URL: http://www.smart-cities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf
146. Smart Communities Guidebook: How California's Communities Can Thrive in the Digital Age. – San Diego: State University of San Diego, 1997.
147. Tang W., Smart City 3.0// Smart City Consortium [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://smartcity.org.hk/index.php/information/smart-city-3-0>.
148. The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability. SANDIA REPORT SAND 2014-1535, March 2014.
149. Verkade N., Höffken J., «The design and development of domestic smart grid interventions: Insights from the Netherlands» J. Clean. Prod., vol. 202. 2018. – P.799-805.
150. Worighi I., Maach A., Hafid A., Hegazy O., Van Mierlo J. «Integrating renewable energy in smart grid system: Architecture, virtualization and analysis» Sustain. Energy, Grids Networks, p. 100226, 2019.
151. Zafar R., Mahmood A., Razzaq S., Ali W., Naeem U., Shehzad K. «Prosumer based energy management and sharing in smart grid». Renew. Sustain.

Energy Rev., vol. 82, no. August 2016. 2018. – P. 1675-1684.

152. <http://digitalsubstation.com/blog/2018/07/24/na-poroge-vtoroj-vojny-tokov-smozhet-li-postoyannyj-tok-zavoevat-mir/> – На пороге второй войны токов: сможет ли постоянный ток завоевать мир?

153. http://energystrategy.ru/projects/Energy_21/4-2.pdf

154. <http://smartenergysummit.ru/novosti/microgrid-%E2%80%93-budushhee-elektrosetej.-kejsyi,-perspektivy,-vozmozhnosti> – Будущее за системами электроснабжения постоянного тока?

155. <https://www.arex.pl/>

156. <https://www.dissercat.com/content/primenenie-evolyutsionnykh-algoritmov-dlya-povysheniya-effektivnosti-gibridnykh-sistem-elekt/read>

157. <https://dixigroup.org/>

158. https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en

159. <https://www.eprussia.ru/epr/234/15558.htm>

160. <https://www.everest.ua/smart-city-tehnologiyi-rozumnogo-mista-i-yih-czilove-pryznachennya-2/>

161. <https://guidehouseinsights.com/news-and-views/navigant-research-names-cisco-and-siemens-the-leading-smart-city-suppliers> (дата звернення 10.03.2020).

162. <https://www.smartgrid.gov/>

163. https://www.ey.com/en_gl/news/2018/08/ey-and-city-of-vienna-collaborate-on-public-blockchain-networks

164. <https://smartcitiescouncil.com/>

ДОДАТОК А

ПЕРЕЛІК ПРОЕКТІВ, ДЕ ЗАДІЯНІ НАЙБІЛЬШ ПРОСУНУТІ СИСТЕМИ MICROGRID

П'ять найбільших проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid [154].

Об'єкт проекту	Технологія	Переваги
1. Gorona Del Viento, Канарські острови	Інтеграція вітрових установок $5 \times 2,3$ МВт з ГАЕС потужністю 11,32 МВт і дизель-генераторами на 11 МВт	Перша у світі інтеграція ГАЕС з відновлюваними джерелами, ефективне керування системою
2. Ross Island, Антарктика	Інтеграція вітрових установок 3×330 кВт з дизель-генераторами 9×125 кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 463000 л / рік, зниження викидів CO ₂ на 2800 т / рік
3. Марбл-Бар, Австралія	Інтеграція фотоелектричної установки 1×300 кВт з дизель-генераторами 4×320 кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 405000 л / рік, зниження викидів CO ₂ на 1100 т / рік
4. Мідний рудник ДеГросса, Австралія	Інтегроване рішення із застосуванням фотовольтаїчної установки 10,6 МВт з системою накопичення з дизель-генераторною установкою, установка стабілізатора PowerStore	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 5 млн. л / рік
5. Острів Кадьяк, Аляска, США	Стабілізація острівної мережі	Стабілізація мережі з коливаннями 9 МВт, продовження терміну життя акумуляторних батарей

Острівні енергетичні мікромережі представляють зараз 36% від усіх обсягів зберігання енергії Tesla, згідно з результатами аналізу Bloomberg New Energy Finance. Крім перерахованих п'яти проектів, з листопада 2016 р. компанія встановила свої акумулятори Powerpack першого або другого покоління на п'яти островах, чотирьох – у Тихому океані: Тау на Американському Самоа, моноліт на Фіджі і Кауаї і Гонолулу на Гаваях. П'ятий проект – на одному з островів у Північній Кароліні, в Атлантичному океані.

ДОДАТОК Б

**ФУНКЦІЇ MICROGRID, ЯКІ ВРАХОВУЮТЬСЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННЯХ,
РОЗРОБКАХ, СТВОРЕННІ ПРОТОТИПІВ І СТАНДАРТИЗАЦІЇ**

№ з/п	Функція	Характеристика функції
1	Незалежність	Малі енергосистеми включають генерацію, накопичення і навантаження, і можуть працювати автономно у режимі підключеної енергосистеми та ізольованому. У першому випадку, мала енергосистема може самостійно оптимізувати своє виробництво і споживання електроенергії за врахування системної економічної оцінки, такої як рішень купівлі чи продажу. В обох режимах, система може звести до мінімуму викиди CO ₂ за рахунок максимізації споживання відновлюваної енергії та мінімізації генерації на основі викопного палива. У ізольованому режимі система здатна до узгодження джерел і навантаження і може тримати напругу системи та частоту в певних межах з відповідним контролем.
2	Стабільність	Незалежне місцеве керування джерелами, акумуляторами, і навантаженнями малих енергосистем засноване на статизмі та рівнях напруги у точці підключення кожного пристрою. Це означає, що мала енергосистема може працювати стабільно протягом номінальних умов експлуатації та під час подій з перехідним процесом незалежно від того, чи більша енергомережа працює чи вийшла зі строю. Проте додаткові дослідження необхідні, щоб досягти високого рівня стабільності, наприклад, щоб усунути непотрібну передачу реактивної потужності між обертовими або генераторами на основі інвертора.
3	Сумісність	Малі енергосистеми повністю сумісні з існуючою місцевою електроенергетичною мережею. Вони можуть розглядатися як функціональні одиниці, які підтримують розвиток існуючої системи у економічно і екологічно чистий спосіб.
4	Гнучкість	Розширення й інтенсивність розширення малої енергосистеми не мають дотримуватися будь-яких точних прогнозів. Підготовчо-

		налагоджувальний час відповідних компонентів (працюючих на викопному паливі та ВДЕ, накопичувальних систем та ін.) є короткими, і мала енергосистема може зростати поступово. Малі енергосистеми також є технологічно нейтральними і в змозі впоратися з різноманітною сумішшю відновлюваних і генераторів, що працюють на викопному паливі.
5	Розширю- ваність	Малі енергосистеми можуть просто зростати за рахунок встановлення додаткових генераторів, накопичувачів і навантажень. Таке розширення, як правило, вимагає додаткового нового проектування малої енергосистеми і може бути виконане на паралельній і модульній основі з метою розширення до більших рівнів виробництва та споживання електроенергії.
6	Ефективність	Централізована, а також структури контрольного контролера розподільної малої енергосистеми може оптимізувати використання генераторів, керувати зарядкою і розрядкою накопичувачів енергії, а також керувати споживанням. Так, цілі керування енергоспоживанням можуть бути глибоко оптимізовані, наприклад, в економічних, а також екологічних аспектах.
7	Економічність	За даними дослідження ринку, економічна оцінка рекуперації тепла і його застосування в системах ТЕЦ (когенерації) є дуже важливою для оцінки малих енергосистем. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії дасть змогу знизити витрати на паливо і викиди CO ₂ .
8	Модель з'єднання рівноправних вузлів	Малі енергосистеми можуть підтримувати справжню модель з'єднання рівноправних вузлів функціонування, керування та торгівлі енергією. Крім того, узгоджені енергетичні операції з централізованою енергосистемою також можливі з цією моделлю. Пропонована концепція не диктує розмір, розширюваність і кількість вузлів і темпи зростання малої енергосистеми.

ДОДАТОК В

ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ

Варіант архітектури розподільних мереж мікрорайону на постійному струмі та оцінки її порівняльної ефективності є у рамках архітектурного проекту IDEA. Традиційна схема на змінному струмі починається з введення в розподільну підстанцію середньої напруги (20 або 10 кВ). До ліній розподільної підстанції підключені знижуючі трансформаторні підстанції, що складаються з двох трансформаторів (основного і резервного) зі зниженням напруги 20 / 0,4 кВ або 10 / 0,4 кВ. На кожну з ліній 0,4 кВ, що йдуть від цих трансформаторів, підключені будинки, які живляться за двома вводами, один з яких резервний. На одну трансформаторну підстанцію може припадати поєднане навантаження від 400 до 1 000 кВт, тобто приблизно 10–15 таунхаусів.

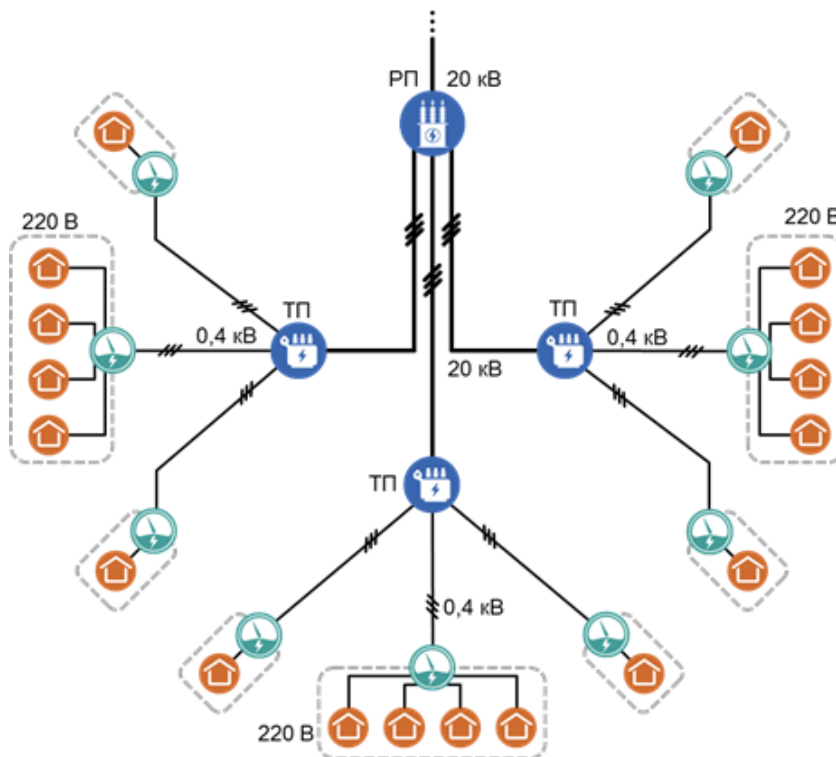


Рисунок В.1 – Енергопостачання мікрорайону на змінному струмі

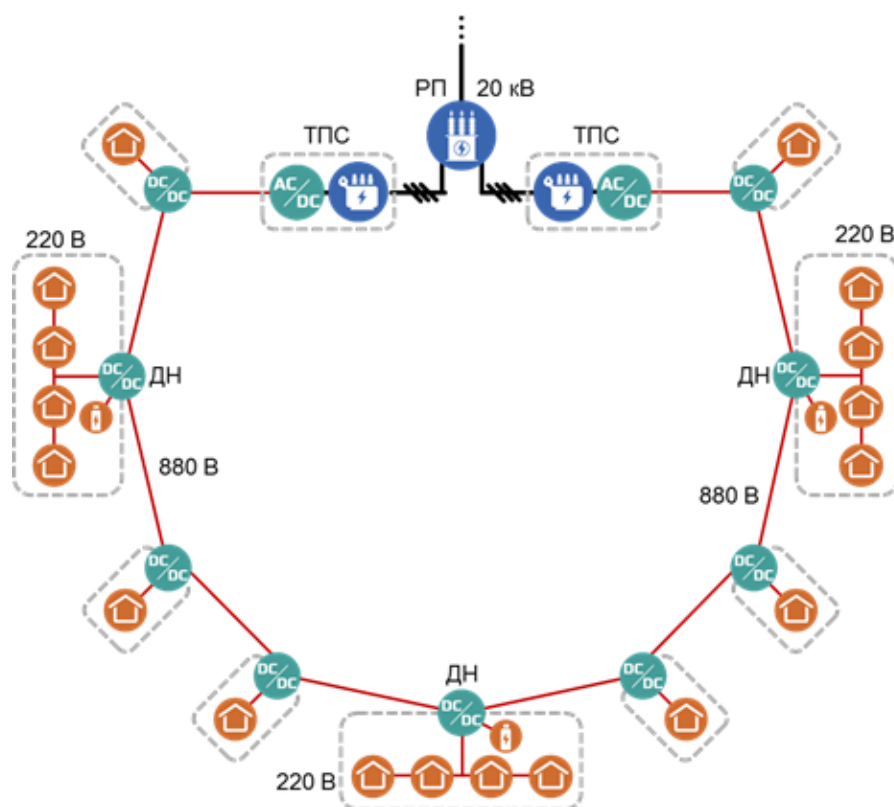


Рисунок В.2 – Енергопостачання мікрорайону на постійному струмі

Схема електропостачання на постійному струмі є замкнутим кільцем постійного струму 880 В – по кільцю на мікрорайон. Кожне кільце спирається на дві знижуючі тягові підстанції з одним трансформатором і активними випрямлячами напруги. На кожне кільце підключені всі будівлі мікрорайону, кожна будівля має введення і виведення, які можуть автоматично, в разі аварійної ситуації, змінюватися за рахунок керування рівнем напруги так, щоб потік потужності міг йти по кільцю за кожним з напрямків. Це забезпечує істотне підвищення надійності без резервування трансформаторних потужностей. І в такій схемі взагалі немає необхідності в трансформаторних підстанціях.

Перетворювачі постійного струму (DC / DC) пропонується виконати на розміщуваних у будівлях ємнісних дільників напруги, що забезпечують послідовне зниження напруги до 440 В і потім до 220 В. У кожному будинку розгортається кілька плечей 440 В і на кожному – кілька плечей 220 В. Двонаправлений потік потужності в рамках кожного плеча, необхідний, наприклад, для установки мікрогенерації, накопичувачів електроенергії і

реалізації локального р2р-ринку електроенергії між будинками, забезпечується керуванням рівня напруги в межах ± 10 В від опорного значення. Для перенаправлення потоку потужності між плечима або з мережі 220 В у мережу 440 В і вище цей потік потужності порціями передається через конденсатори ємнісних подільників і за рахунок керування рівнем напруги в іншому плечі або в мережі більш високої напруги. Це потребує реалізації цифрової системи керування перетіканнями потужності та набору інтелектуальних інтерфейсів між плечима і мережами схеми. У цьому разі накопичувачі енергії можуть бути підключені в такій схемі без інверторів паралельно на шину конденсаторів ємнісних дільників.

Наведена схема має чималий набір переваг у порівнянні з електропостачанням на змінному струмі та хорошим потенціалом ефективності:

- за рахунок більш ніж дворазового збільшення напруги розподільної мережі (880 В на постійному струмі проти 380 В на змінному) зменшується перетин ліній розподільної мережі мікрорайону і збільшується їхня робоча довжина;
- підстанції 20 / 0,88 кВ можуть бути як однострансформаторні з достатнім рівнем надійності;
- істотно знижується необхідний обсяг кабельної продукції;
- скорочується розмір відчужуваної території під будівництво мережевих підстанцій та розподільної мережі;
- зникають проблеми з якістю електроенергії, рівнем напруги, гармонійним складом струму і реактивною потужністю;
- скорочуються технічні втрати електроенергії;
- забезпечується проста інтеграція систем накопичення енергії і мікрогенерації, в тому числі на відновлюваних джерелах енергії.

Сучасні локальні мережі постійної напруги мають цілу низку переваг, серед яких необхідно відзначити такі [47]:

- загальне перетворення із змінної напруги в постійну для всіх навантажень зменшує втрати на 10–20%;

- ефективне інтегрування ВДЕ, що є також джерелами постійної напруги (сонячні батареї, невеликі вітряні турбіни, паливні елементи тощо);
- більш ефективне застосування накопичувачів електричної енергії;
- просте узгодження перерахованих джерел і накопичувачів постійної напруги, що не вимагають взаємної синхронізації;
- більш ефективне керування графіками навантаження (включаючи накопичення електричної енергії в періоди наявності надлишкової генерації і видачу в періоди дефіциту);
- підвищена електробезпека мереж постійного струму.

Мережі постійної напруги з великою кількістю керованих генераторів і накопичувачів електроенергії вже з повною підставою можна буде називати інтелектуальними мережами (Smart Grid). Інтелектуальні мережі постійної напруги можуть надати як постачальнику електроенергії, так і споживачеві низку функцій, які реалізуються значно простіше, ніж у традиційних мережах, а саме:

- керування розподіленою генерацією і накопиченням із забезпеченням демпфірування коливань потужності та продажу енергії в мережу;
- взаємодія з мережею вищого рівня з контролю за вживанням / генерації електроенергії, у т.ч. з продажу електроенергії;
- керування у разі перебоїв у електропостачанні з відключенням частини споживачів;
- керування резервним енергопостачанням найважливіших споживачів від накопичувачів електроенергії;
- керування навантаженням з оптимізацією плати за електроенергію.

Загальна схема побудови електромережі за концепцією Smart Grid наведена на рис. В.3.



Рисунок В.3 – Загальна схема побудови електромережі за концепцією Smart Grid

ДОДАТОК Г

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ОРИГІНАЛІВ У РАЗІ ДІЇ СКЛАДНИХ ФУНКЦІЙ НАПРУГИ

Приклад Г.1. Знайдемо зображення напруги у разі складної імпульсної функції сигналу генератора на основі функції рівня (рис. 3.3). Інтервал роботи схеми T включає в себе два інтервали дії імпульсних сигналів (завад), кожен з яких також складається з двох інтервалів – інтервалу дії генератора завад та інтервалу паузи.

Будемо вважати, що ці інтервали мають однакову тривалість, тоді $T = 4T_{imp}$. Для визначення формули зображення сигналу через перетворення Лапласа застосуємо загальну формулу:

$$U(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_i})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (\text{Г.1})$$

Відповідно

$$n = 4, T_i = 4T_{imp}, U_1 = U_{imp}, U_2 = 0, U_3 = -U_{imp}, U_4 = 0. \quad (\text{Г.2})$$

Тоді зображення сигналу для квазіусталеного процесу на першому інтервалі матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} U(p) &= \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} = \\ &= \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} + U_3 e^{-(3-1)pT_{imp}} + U_4 e^{-(4-1)pT_{imp}} \right] = \\ &= \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 + U_2 e^{-pT_{imp}} + U_3 e^{-2pT_{imp}} + U_4 e^{-3pT_{imp}} \right] = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right] \quad (\text{Г.3}) \end{aligned}$$

Підставимо значення (Г.2) в (Г.3) і отримаємо вираз

$$U(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right] \quad (\text{Г.4})$$

Для визначення зображень на інших інтервалах необхідно змістити початок координат та відповідно перепозначити значення напруг на інтервалах у (Г.3).

Приклад Г.2. Для відображення особливостей аналізу за врахування умови нестационарності навантаження розглянемо випадок, коли у разі дії генератора

напруги складної форми на основі функції рівня (див. рис. 3.4) активно-індуктивне навантаження має змінні параметри активного опору. Інтервали зміни параметрів схеми мають однакову тривалість $T_T = 6T$.

Зміна активної складової RL-навантаження задається співвідношенням

$$R(t) = R_i = \begin{cases} R_1, \text{ при } t \in [0, 2T) \\ R_2, \text{ при } t \in [2T, 6T) \end{cases}. \quad (\Gamma.5)$$

Згідно з (3.25), (3.26) зображення напруги має такий вигляд:

$$U(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})} \sum_{i=1}^6 U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (\Gamma.6)$$

Миттєві значення струму навантаження знайдемо методом окремих складових. Визначимо струм $i(t)$ на інтервалі $0 \leq t < T$, навантаження $Z = R_1 + j\omega L$.

Зображення струму навантаження:

$$i_{nl}(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-6pT})(R_1 + pL)} \sum_{i=1}^6 U_i e^{-(i-1)pT}. \quad (\Gamma.7)$$

У разі знаходження оригіналів струмів враховуємо, що $\alpha_i = R_i / L$; $I_i = U_i / R_i$. У табл. Г.1 зведено значення величин U_i , R_i , α_i , I_i для j -го ($n_T = 6$) інтервалу періоду T_T .

Таблиця Г.1 – Значення параметрів на інтервалах

Величина	Номер інтервалу					
	1	2	3	4	5	6
U_i	U_1	$-U_1$	U_2	$-U_2$	U_3	$-U_3$
R_i	R_1	R_1	R_2	R_2	R_2	R_2
α_i	$\frac{R_1}{L}$	$\frac{R_1}{L}$	$\frac{R_2}{L}$	$\frac{R_2}{L}$	$\frac{R_2}{L}$	$\frac{R_2}{L}$
I_i	$\frac{U_1}{R_1}$	$-\frac{U_1}{R_1}$	$\frac{U_2}{R_2}$	$-\frac{U_2}{R_2}$	$\frac{U_3}{R_2}$	$-\frac{U_3}{R_2}$

Згідно з викладеним вище, вільний струм $i_{вл}(t)$ знаходимо з такого співвідношення:

$$\begin{aligned}
i_{6,l}(t) = & -\frac{e^{-\alpha_1 t}}{1 - e^{-\left(\sum_{k=1}^6 \alpha_k\right)T}} \left[I_6 (1 - e^{-\alpha_6 T}) + I_5 (1 - e^{-\alpha_5 T}) e^{-\alpha_6 T} + I_4 (1 - e^{-\alpha_4 T}) e^{-\alpha_6 T} e^{-\alpha_5 T} + \right. \\
& + I_3 (1 - e^{-\alpha_3 T}) e^{-\alpha_6 T} e^{-\alpha_5 T} e^{-\alpha_4 T} + I_2 (1 - e^{-\alpha_2 T}) e^{-\alpha_6 T} e^{-\alpha_5 T} e^{-\alpha_4 T} e^{-\alpha_3 T} + \\
& \left. + I_1 (1 - e^{-\alpha_1 T}) e^{-\alpha_6 T} e^{-\alpha_5 T} e^{-\alpha_4 T} e^{-\alpha_3 T} e^{-\alpha_2 T} \right]. \quad (\Gamma.8)
\end{aligned}$$

Перехідний струм $i_{\text{пер}1}(t)$ на інтервалі $0 \leq t < T$ визначається так:

$$i_{\text{пер}1}(t) = \frac{U_1}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_1}{L}t}).$$

Струм навантаження $i_{\text{н}1}(t)$ на інтервалі $0 \leq t < T$ знаходиться з виразу

$$i_{\text{н}1}(t) = i_{\text{пер}1}(t) - i_{\text{гн}1}(t).$$

Для знаходження струмів $i_{\text{вл}j}(t)$, $i_{\text{пер}j}(t)$, $i_{\text{н}j}(t)$ при $j = 2, \dots, 6$ необхідно початок координат зміщувати вправо на величину $(j-1)T$. Алгоритм розрахунків – аналогічно попередньому інтервалу.

Приклад Г.3. Розглянемо формування зображення напруги сигналу генератора складної форми на основі синусоїдальної функції (рис. 3.20). Інтервал роботи схеми T включає в себе два інтервали дії завад, кожен з яких також складається з двох інтервалів – інтервалу дії генератора завад та інтервалу паузи. Тут і далі будемо вважати, що ці інтервали мають однакову тривалість, тоді $T = 4T_{\text{imp}}$.

Для визначення формули зображення сигналу через перетворення Лапласа застосуємо загальну формулу:

$$F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} \quad (\Gamma.9)$$

Відповідно

$$n = 4, T_i = 4T_{\text{imp}}, U_1 = U_{\text{imp}}, U_2 = 0, U_3 = -U_{\text{imp}}, U_4 = 0. \quad (\Gamma.10)$$

Тоді зображення сигналу для квазіусталеного процесу на першому інтервалі матиме вигляд

$$U(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} + U_3 e^{-(3-1)pT_{imp}} + U_4 e^{-(4-1)pT_{imp}} \right] = \\
&= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_1 + U_2 e^{-pT_{imp}} + U_3 e^{-2pT_{imp}} + U_4 e^{-3pT_{imp}} \right] = \\
&= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right]. \quad (\Gamma.11)
\end{aligned}$$

Підставимо значення (Г.10) в (Г.11) і отримаємо вираз

$$U(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-4pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-2pT_{imp}} \right]. \quad (\Gamma.12)$$

Для визначення зображень на інших інтервалах необхідно змістити початок координат та відповідно перепозначити значення напруг на інтервалах у (Г.13).

У випадку $T_{imp} = T/2$ отримуємо синусоїдальний сигнал (див. рис. Г.1), відповідно формули спрощуються:

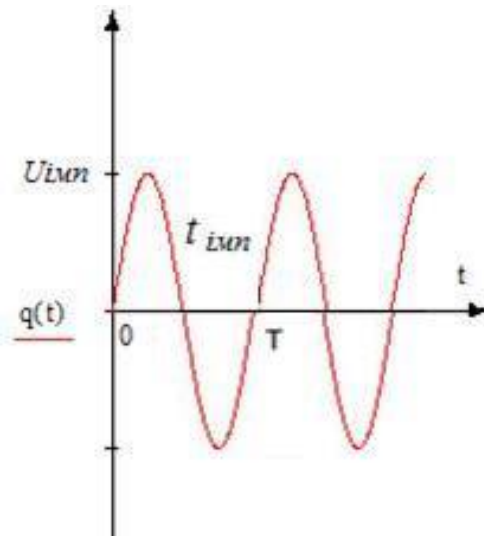
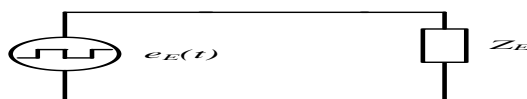


Рисунок Г.1 – Вигляд синусоїдального сигналу після спрощення


У такому разі $n=2$, $T_{II} = 2T_{imp}$, $U_1 = U_{imp}$, $U_2 = -U_{imp}$, підставимо ці значення у (Г.9).

Тоді зображення сигналу для квазіусталеного процесу на першому інтервалі матиме вигляд



$$\begin{aligned}
&= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-2pT_{imp}})} \left[U_1 e^{-(1-1)pT_{imp}} + U_2 e^{-(2-1)pT_{imp}} \right] = \\
&= \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})}{(1 - e^{-2pT_{imp}})} \left[U_{imp} - U_{imp} e^{-pT_{imp}} \right] = \\
&= \frac{U_{imp} \omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 + e^{-pT_{imp}})(1 - e^{-pT_{imp}})}{(1 + e^{-pT_{imp}})(1 - e^{-pT_{imp}})} = \frac{U_{imp} \omega}{p^2 + \omega^2}
\end{aligned}$$

Тобто отримуємо вираз зображення напруги у разі синусоїдального сигналу генератора.

Приклад Г.4. Знайдемо аналітичний вираз для струму схеми з  та синусоїдальною формою сигналу генератора з періодом синусоїди T та періодом роботи схеми $T/2$ (див. рис. 3.26).

Наведемо формули для знаходження зображень струму, комплексного опору та оригіналу струму через перехідний та вільний струми:

$$U(p) = \frac{(1 + e^{-p\frac{T}{2}})}{(1 - e^{-p\frac{T}{2}})} \frac{\omega U}{(p^2 + \omega^2)} ; \quad (\text{Г.13})$$

$$Z(p) = pL + R ; \quad (\text{Г.14})$$

$$i(t) = i_{per}(t) - i_{vl}(t) . \quad (\text{Г.15})$$

Перехідний струм $i_{пер}(t)$ розраховується знаходженням оригіналу від струму, що виникає у результаті дії генератора як нескінченної функції на періоді, що розглядається. Тоді зображення напруги генератора для розрахунку перехідного струму буде

$$U(p) = \frac{\omega U}{(p^2 + \omega^2)} , \quad (\text{Г.16})$$

у цьому разі враховуються всі корені знаменника. Вільний струм $i_{вл}(t)$ розраховується знаходженням оригіналу струму, що виникає у результаті дії генератора на всіх попередніх інтервалах роботи схеми (рахується квазіусталений процес, тобто попередніх інтервалів нескінченна множина). Враховуються лише корені, що утворені зображенням навантаження.

Розрахуємо перехідний струм:

$$I(p) = \frac{\omega U}{L(p^2 + \omega^2)(p + \sigma)}; \quad (\text{Г.17})$$

$$i_{per}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (\text{Г.18})$$

Зведемо корені рівняння (Г.18) у табл. Г.2 та розрахуємо частини рівняння $A(p_k)$ та $B'(p_k)$.

Таблиця Г.2 – Корені рівняння

p_k	$A(p_k)$	$B'(p_k)$	$\frac{A(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t}$
$p_1 = -\sigma$	ωU	$L(3(-\sigma)^2 + 2\sigma(-\sigma) + \omega^2) =$ $= L(3\sigma^2 - 2\sigma^2 + \omega^2) =$ $= L(\sigma^2 + \omega^2)$	$\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t}$
$p_2 = i\omega$	ωU	$L(3(i\omega)^2 + 2\sigma(i\omega) + \omega^2) =$ $= L(-3\omega^2 + 2i\omega\sigma + \omega^2) =$ $= L(-2\omega^2 + 2i\omega\sigma)$	$\frac{U\omega}{L(-2\omega^2 + 2i\omega\sigma)} e^{i\omega t}$

Зведемо корені у рівняння та спростимо вираз:

$$\begin{aligned}
 i_{per}(t) &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] + 2 \operatorname{Re} \left[\frac{U\omega}{L(-2\omega^2 + 2i\omega\sigma)} e^{i\omega t} \right] = \\
 &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] + \operatorname{Re} \left[\frac{U}{L(-\omega + i\sigma)} e^{i\omega t} \right] = \\
 &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] + \frac{U}{L} \operatorname{Re} \left[\frac{(\omega + i\sigma)}{(\omega + i\sigma)} \frac{1}{(-\omega + i\sigma)} e^{i\omega t} \right] = |(a+b)(a-b) = (a^2 + b^2)| = \\
 &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] + \frac{U}{L} \operatorname{Re} \left[-\frac{i\sigma e^{i\omega t} + \omega e^{i\omega t}}{(\sigma^2 + \omega^2)} \right] = |e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t| = \\
 &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] - \frac{U}{L} \operatorname{Re} \left[\frac{i\sigma \cos \omega t + (i)^2 \sigma \sin \omega t + \omega \cos \omega t + i\omega \sin \omega t}{(\sigma^2 + \omega^2)} \right] = \\
 &= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] - \frac{U}{L} \operatorname{Re} \left[\frac{-\sigma \sin \omega t + \omega \cos \omega t + i\sigma \cos \omega t + i\omega \sin \omega t}{(\sigma^2 + \omega^2)} \right] =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left[\frac{U\omega}{L(\sigma^2 + \omega^2)} e^{-\sigma t} \right] + \frac{U(\sigma \sin \omega t - \omega \cos \omega t)}{L(\sigma^2 + \omega^2)} = \left| \frac{\times L}{\times L} \right| = \frac{U \left[\omega L e^{-\sigma t} + R \sin \omega t - \omega L \cos \omega t \right]}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \left| \frac{: R}{: R} \right| = \\
&= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\frac{\frac{\omega L}{R} e^{-\sigma t}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} + \frac{\sin \omega t}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} - \frac{\frac{\omega L}{R} \cos \omega t}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} \right] = \\
&= \left| \frac{\frac{\omega L}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} = \sin(\psi); \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} = \cos(\psi); \psi = \arctg \frac{\omega L}{R} \right| = \\
&= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\psi) e^{-\sigma t} + \sin \omega t \cos(\psi) - \cos \omega t \sin(\psi) \right] = \\
&= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \psi) + \sin(\psi) e^{-\sigma t} \right] \quad (\Gamma.19)
\end{aligned}$$

Отже перехідний струм

$$i_{per}(t) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \psi) + \sin(\psi) e^{-\sigma t} \right]; \psi = \arctg \frac{\omega L}{R}. \quad (\Gamma.20)$$

Цей розрахунок актуальний для будь-яких варіацій синусоїдальних сигналів. Тепер розрахуємо вільний струм:

$$I(p) = \frac{(1 + e^{-pT_l})}{(1 - e^{-pT_r})} \frac{\omega U}{L(p + \sigma)(p^2 + \omega^2)}. \quad (\Gamma.21)$$

Враховуємо лише корені, що утворені навантаженням:

$$\begin{aligned}
i_{wl}(t) &= \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t}; p_k = -\sigma; \\
A(p) &= \frac{U\omega}{L} (1 + e^{-pT_l}); \\
B(p) &= L(1 - e^{-pT_r})(p + \sigma)(p^2 + \omega^2); \\
B(p)' &= [(1 - e^{-pT_r})(p + \sigma)(p^2 + \omega^2)]' = [(p - p e^{-pT_r} + \sigma - \sigma e^{-pT_r})(p^2 + \omega^2)]' = \\
&= [p^3 - p^3 e^{-pT_r} + \sigma p^2 - \sigma p^2 e^{-pT_r} + p\omega^2 - p\omega^2 e^{-pT_r} + \sigma\omega^2 - \sigma\omega^2 e^{-pT_r}]
\end{aligned}$$

Знаходимо похідні окремих членів:

$$(e^{-pT_r})' = -T_r e^{-pT_r}. \quad (\Gamma.22)$$

Формула похідної добутку $(fg)' = f'g + fg'$.

Тоді

$$\begin{aligned}
 (p^3 e^{-pT_r})' &= 3p^2 e^{-pT_r} - p^3 T_r e^{-pT_r}, \\
 (\sigma p^2 e^{-pT_r})' &= 2p\sigma e^{-pT_r} - p^2 \sigma T_r e^{-pT_r} \\
 (\omega^2 p e^{-pT_r})' &= \omega^2 e^{-pT_r} - \omega^2 p T_r e^{-pT_r} \\
 (\omega^2 \sigma e^{-pT_r})' &= -\omega^2 \sigma T_r e^{-pT_r} \\
 B(p)' &= 3p^2 - 3p^2 e^{-pT_r} + p^3 T_r e^{-pT_r} + 2p\sigma - 2p\sigma e^{-pT_r} + p^2 \sigma T_r e^{-pT_r} + \\
 &\quad + \omega^2 - \omega^2 e^{-pT_r} + \omega^2 p T_r e^{-pT_r} + \sigma \omega^2 T_r e^{-pT_r} = |p = -\sigma| = \\
 &= 3\sigma^2 - 3\sigma^2 e^{\sigma T_r} - \sigma^3 T_r e^{\sigma T_r} - 2\sigma^2 + 2\sigma^2 e^{\sigma T_r} + \sigma^3 T_r e^{\sigma T_r} + \\
 &\quad + \omega^2 - \omega^2 e^{\sigma T_r} - \omega^2 \sigma T_r e^{\sigma T_r} + \sigma \omega^2 T_r e^{\sigma T_r} = \sigma^2 - \sigma^2 e^{\sigma T_r} + \omega^2 - \omega^2 e^{\sigma T_r} = \\
 &= (\sigma^2 + \omega^2)(1 - e^{\sigma T_r}). \tag{Г.23}
 \end{aligned}$$

Підставимо формулу похідної знаменника у формулу знаходження оригінала вільного струму:

$$\begin{aligned}
 i_{w1}(t) &= \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t} = |p_k = -\sigma| = \frac{(1 + e^{\sigma T_1}) \omega U e^{-\sigma}}{L(1 - e^{\sigma T_1})(\sigma^2 + \omega^2)} = \left[\frac{\times e^{-\sigma T_r}}{\times e^{-\sigma T_r}} \right] = \left| T_r = \sum_{i=1}^n T_i \right| = \\
 &= \frac{(1 + e^{\sigma T_1}) e^{-\sigma T_1} e^{-\sigma(T_r - T_1)} \omega U e^{-\sigma}}{L(1 - e^{\sigma T_r})(\sigma^2 + \omega^2)} = \frac{(1 + e^{-\sigma T_1}) e^{-\sigma(T_r - T_1)} \omega U e^{-\sigma}}{L(1 - e^{-\sigma T_r})(\sigma^2 + \omega^2)} = \left[\frac{\times L}{\times L} \right] = \\
 &= \frac{U \omega L (1 + e^{-\sigma T_1}) e^{-\sigma(T_r - T_1)} e^{-\sigma}}{L(1 - e^{-\sigma T_r})(R^2 + (\omega L)^2)} = \left[\frac{: R}{: R} \right] = \frac{U \frac{\omega L}{R} (1 + e^{-\sigma T_1}) e^{-\sigma(T_r - T_1)} e^{-\sigma}}{(1 - e^{-\sigma T_r}) \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2}} = \\
 &= \left| \frac{\frac{\omega L}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2}} = \sin(\psi); \psi = \arctg \frac{\omega L}{R} \right| = - \frac{U \sin(\psi) (1 + e^{-\sigma T_1}) e^{-\sigma(T_r - T_1)} e^{-\sigma}}{(1 - e^{-\sigma T_r}) \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \tag{Г.24}
 \end{aligned}$$

За декількох інтервалів роботи схеми відбувається перепозначення значень напруги на інтервалах.

ДОДАТОК Д

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ У ЕТК-SMART

Спочатку розглянемо особливості алгоритму для кожного виду функцій, особливості розрахунку складних функцій методом накладання, особливості знаходження основних коефіцієнтів та характеристик, що характеризують якість електричної енергії, особливості форми та гармонічного складу, інші характеристики. Далі буде розглянуто особливості використання алгоритму для розрахунку перехідних процесів у ЕТК-Smart з модульованими параметрами.

Загальна блок-схема алгоритму наведена на рис. Д.1.

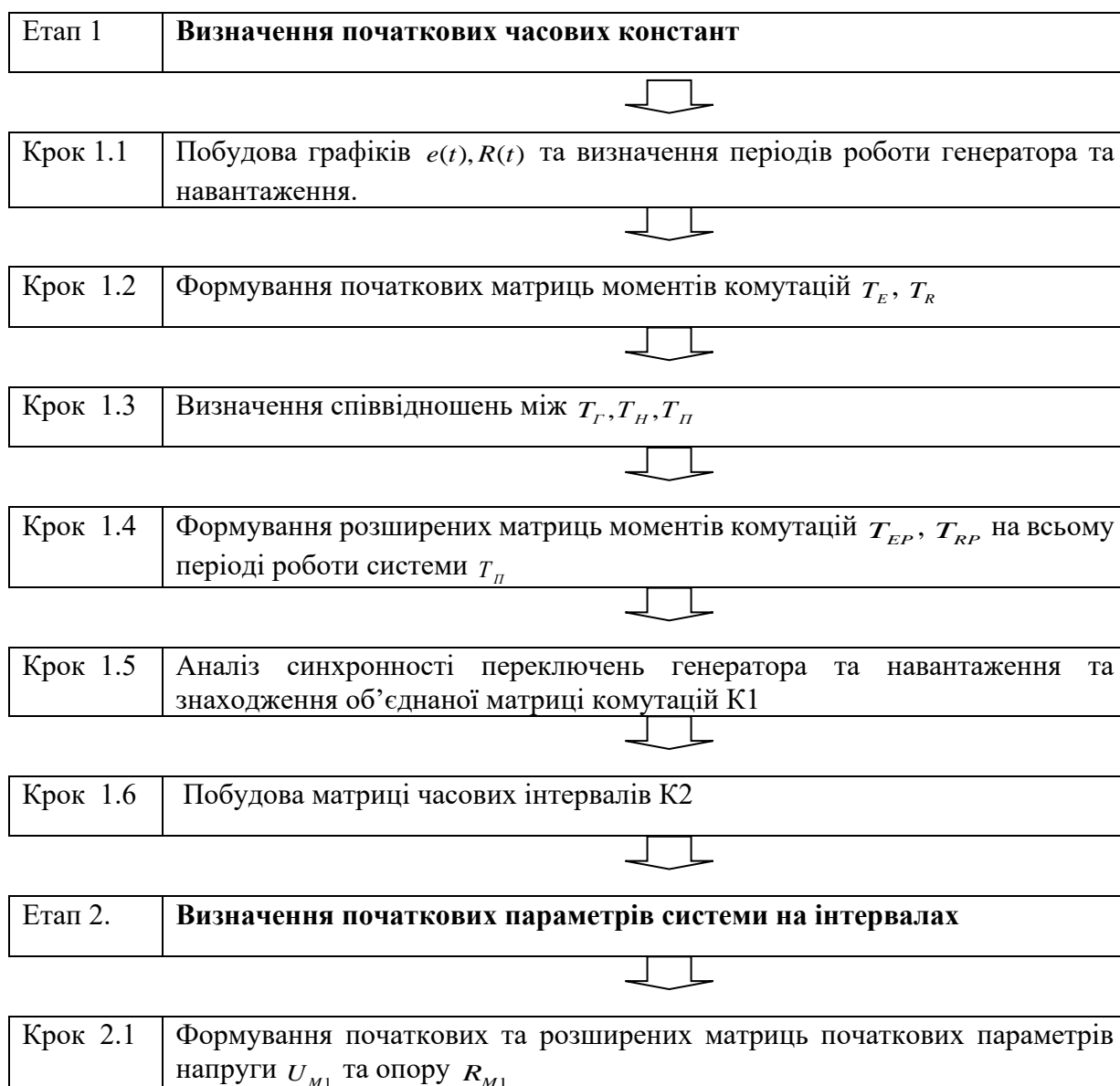




Рисунок Д.1 – Загальна блок-схема алгоритму

Охарактеризуємо кожен з етапів наведеного на рис. Д.1 алгоритму.

Етап 1. Визначення початкових часових констант.

Крок 1.1 Побудова графіків $e(t), R(t)$ та визначення періодів роботи генератора і навантаження.

Графіки будуються у одному масштабі часової осі, періоди мають розпочинатися одночасно на початку координат, без фазових зміщень (якщо при роботі схеми має місце фазове зміщення, необхідно обрати період функції відповідно до вимог). Приклад побудови графіка наведено на рис. Д.2.

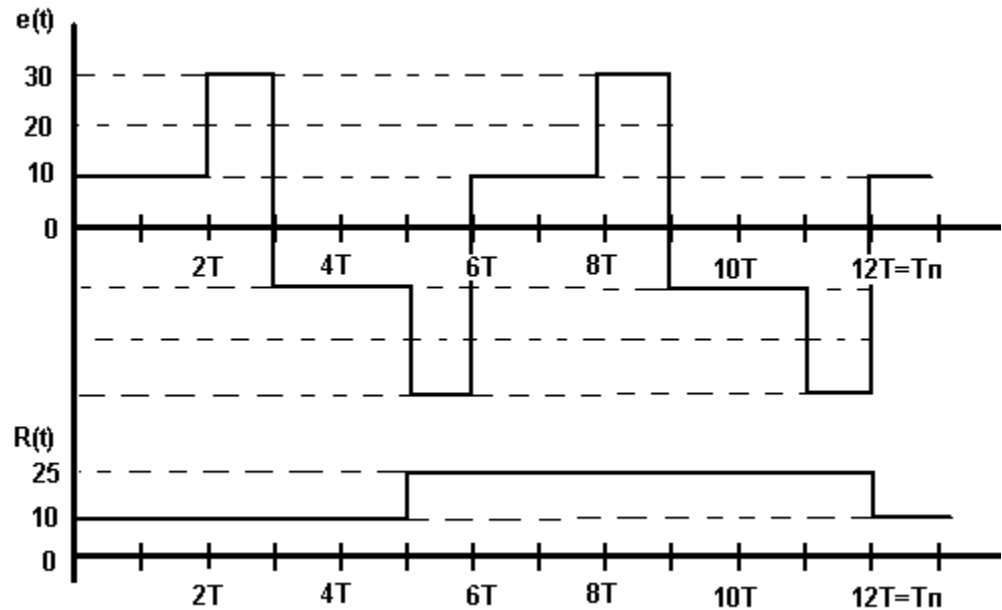


Рисунок Д.2 – Приклад побудови графіка

Крок 1.2. Формування матриць моментів комутацій T_E , T_R .

- 1) матриця моментів комутацій генератора T_E , розмірність $n_A \times 1$:

i	1	2	3	...	n_G
T_{Ei}	$T_{E,1}$	$T_{E,2}$	$T_{E,3}$	...	T_{E,n_G}

- 2) матриця моментів комутацій навантаження T_R , розмірність $n_H \times 1$:

i	1	2	3	...	n_H
T_{Ri}	$T_{R,1}$	$T_{R,2}$	$T_{R,3}$	...	T_{R,n_H}

Нульова комутація умовно відноситься до попереднього інтервалу.

Визначення співвідношень між T_G, T_H, T_{Π} .

Приймемо позначення: T_{Π} – період роботи всієї системи, що може містити один або декілька періодів T_G, T_H . Визначення T_{Π} проводимо таким чином:

- 1) $\partial_i / \partial_A = n_1$. Якщо n_1 – ціле, то $T_H = n_1 T_G = T_{\Pi}$;
- 2) $\partial_A / \partial_i = n_2$. Якщо n_2 – ціле, то $T_G = n_2 T_H = T_{\Pi}$;
- 3) якщо n_1, n_2 – нецілі, то маємо випадок $n_3 T_G = n_4 T_H = T_{\Pi}$, n_3, n_4 – цілі.

Коефіцієнти n_3, n_4 визначаємо через знаходження найменшого спільного кратного (тут це буде T_{II}) для T_{Γ}, T_H .

Для машинного алгоритму тут використовуємо процедуру знаходження найменшого спільного кратного. У переважній більшості систем присутня єдина синхронізація усіх підсистем і відповідно комутацій. Максимальна величина T_{II} , за якої можливі розрахунки визначаються виключно програмними або апаратними обмеженнями ЕОМ.

Крок 1.4. Формування розширених матриць моментів комутацій T_{EP} , T_{RP} на всьому періоді роботи системи T_{II} .

Розширена матриця моментів комутацій генератора T_{EP} , розмірність $n_A n_3 \times 1$:

i	1	2	3	...	n_{Γ}	$n_{\Gamma} + 1$	$n_{\Gamma} + 2$	$n_{\Gamma} + 3$	...	$n_A n_3$
T_{Ei}	$T_{E,1}$	$T_{E,2}$	$T_{E,3}$	...	$T_{E,n_{\Gamma}}$	$T_{E,1}$	$T_{E,2}$	$T_{E,3}$	...	$T_{E,n_{\Gamma}}$

Розширена матриця моментів комутацій генератора T_{RP} , розмірність $n_H n_4 \times 1$:

i	1	2	3	...	n_H	$n_H + 1$	$n_H + 2$	$n_H + 3$	...	$n_H n_4$
T_{Ri}	$T_{R,1}$	$T_{R,2}$	$T_{R,3}$	...	T_{R,n_H}	$T_{R,1}$	$T_{R,2}$	$T_{R,3}$	...	T_{R,n_H}

Крок 1.5. Аналіз синхронності переключень генератора та навантаження та знаходження об'єднаної матриці комутацій К1.

Залежно від визначеного випадку за пунктом 1.3 можливі такі випадки:

1) якщо $T_H = n_1 T_{\Gamma} = T_{II}$, то здійснюється перевірка приналежності множини T_{RP} до множини T_{EP} . Якщо результат позитивний, то матриця T_{EP} – об'єднана матриця комутацій К1; кількість комутацій системи $n = n_{\Gamma} n_1$. Якщо результат негативний, то випадок 3 нижче;

2) якщо $T_{\Gamma} = n_2 T_H = T_{II}$, то здійснюється перевірка приналежності множини T_{EP} до множини T_{RP} . Якщо результат позитивний, то матриця T_{RP} – об'єднана

матриця комутацій $K1$; кількість комутацій системи $n = n_H n_2$. Якщо результат негативний, то випадок 3 нижче;

3) якщо перевірки 1 та 2 дали негативний результат або $n_3 T_\Gamma = n_4 T_H = T_\Pi$, то матриця $K1$ знаходиться як об'єднання матриць T_{EP} та T_{RP} : $K1 = T_{EP} \cup T_{RP}$; кількість комутацій системи n – кількість різних елементів об'єднаної матриці комутацій $K1$.

Для подальших розрахунків, аби не втратити інформацію про характер комутацій, у матриці $K1$ введемо два додаткові рядки, що визначають характер комутацій. Якщо у певний момент часу відбувається комутація генератора, то у відповідну комірку першого додаткового рядку пишемо 1, якщо не відбувається – 0; аналогічно і для навантаження. Матриця $K1$ має такий вигляд:

i	1	2	3	4	...	n
T_i	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	...	τ_n
Γ	1	0	1	0	...	1
H	0	0	1	1	...	0

Відповідно, комутації типу 1–1 є одночасними комутаціями генератора та навантаження, типу 1–0 – комутаціями генератора, навантаження незмінне, типу 0–1 – комутаціями навантаження, генератор не комутується, типу 0–0 – відсутністю комутацій і генератора, і навантаження (використовується у разі розрахунку складних функцій методом накладання).

Для машинного алгоритму використовується окрема процедура.

Крок 1.6. Побудова матриці часових інтервалів $K2$, розмірність $n \times 1$. Здійснюємо перехід від моментів комутацій до тривалості i -х інтервалів сталих параметрів роботи системи.

i	1	2	3	4	...	n
τ_i	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	...	τ_n

Тут $\tau_i = T_i - T_{i-1}$; нульова комутація відбувається у нульовий момент часу.

Етап 2. Визначення початкових параметрів системи на інтервалах.

Крок 2.1. Формування початкових U_{M1} , R_{M1} та розширених U_{MP} , R_{MP} матриць початкових параметрів напруги та опору.

Початкова матриця U_{M1} , розмірність $n_A \times 3$, параметрів міжкомутаційних напруг складається з усіх параметрів напруг на кожному міжкомутаційному інтервалі. Для стандартизації машинного алгоритму та виділення необхідного обсягу пам'яті ЕОМ у найбільш складному випадку кількість рядків матриці визначається максимальною кількістю параметрів, що потрібні для повного опису функцій напруги усіх функцій. Максимум початкових параметрів мають синусоїдальна та експоненціальна функції, кількість параметрів дорівнює трьом. Відповідно матриця U_{M1} має вигляд:

i	1	2	3	4	...	n_r
$\Pi 1_i$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$
$\Pi 2_i$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$
$\Pi 3_i$	$\Pi 3_1$	$\Pi 3_2$	$\Pi 3_3$	$\Pi 3_4$	...	$\Pi 3_{n_r}$

Тут $\Pi 1_i$ – перший параметр напруги перед i -ю комутацією, $\Pi 2_i$, $\Pi 3_i$ – відповідно другий та третій параметри.

Розширена матриця параметрів напруги U_{MP} , розмірність $n_A n_3 \times 3$:

i	1	2	3	4	...	n_r	$n_r + 1$	$n_r + 2$	$n_r + 3$	$n_r + 4$	...	$2n$
$\Pi 1_i$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$
$\Pi 2_i$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$	$\Pi 1_1$	$\Pi 1_2$	$\Pi 1_3$	$\Pi 1_4$	...	$\Pi 1_{n_r}$
$\Pi 3_i$	$\Pi 3_1$	$\Pi 3_2$	$\Pi 3_3$	$\Pi 3_4$	...	$\Pi 3_{n_r}$	$\Pi 3_1$	$\Pi 3_2$	$\Pi 3_3$	$\Pi 3_4$	...	$\Pi 3_{n_r}$

Початкова матриця міжкомутаційних опорів R_{M1} , розмірність $n_f \times 1$:

i	1	2	3	4	...	n_H
R_i	R_1	R_2	R_3	R_4	...	R_{n_H}

Тут R_i – напруга перед i -ю комутацією.

Розширена матриця міжкомутаційних опорів R_{MP} :

i	1	2	3	4	...	n_H	$n_H + 1$	$n_H + 2$	$n_H + 3$	$n_H + 4$	...	$2n$
R_i	R_1	R_2	R_3	R_4		R_{n_H}	R_1	R_2	R_3	R_4		R_{n_H}

Крок 2.2. Формування матриці інтервальних параметрів П1.

З урахуванням матриць $K1$ та $K2$ будуємо матрицю інтервальних параметрів системи:

i	1	2	3	...	n
$\Pi 1_i$	$\check{I} 1_1$	$\check{I} 1_2$	$\check{I} 1_3$	...	$\check{I} 1_n$
$\Pi 2_i$	$\check{I} 2_1$	$\check{I} 2_2$	$\check{I} 2_3$	...	$\check{I} 2_n$
$\Pi 3_i$	$\check{I} 3_1$	$\check{I} 3_2$	$\check{I} 3_3$	...	$\check{I} 3_n$
R_i	R_1	R_2	R_3	...	R_n

Матриця формується таким чином:

- 1) початкові значення напруги та опору відповідають першим елементам матриць U_{M1} , R_{R1} ;
- 2) якщо i -та комутація 1–1 типу, то відбувається зміна функції напруги та опору відносно попереднього інтервалу;
- 3) якщо i -та комутація 1–0 типу, то відбувається зміна функції напруги, опір незмінний відносно попереднього інтервалу;
- 4) якщо i -та комутація 0–1 типу, то функція напруги незмінна, відбувається зміна значень опору відносно попереднього інтервалу;
- 5) якщо i -та комутація 0–0 типу, то функції напруги та опір незмінні відносно попереднього інтервалу.

Крок 2.3. Визначення матриці інтервальних значень П2.

З урахуванням матриці П1 знаходимо матрицю П2 – матрицю інтервальних значень.

i	1	2	3	...	n
I_i	I_1	I_2	I_3	...	I_n
σ_i	σ_1	σ_2	σ_3	...	σ_n
ψ_i	ψ_1	ψ_2	ψ_3	...	ψ_n

Введемо позначення $I_i = \frac{U_i}{R_i}$, $\sigma_i = \frac{R_i}{L}$, $\psi_i = \arctg \frac{\omega_i L}{R_i}$.

Крок 2.4. Формування об'єднаної розширеної матриці параметрів ПЗ

З урахуванням матриць К2, П1 та П2 будуємо матрицю ПЗ. Для подальших розрахунків вводимо додаткову частину матриці для $i = n+1..2n$; $\Pi_{i+n} = \Pi_i$, де Π_{i+n}, Π_i – будь-які параметри системи додаткової та основної частин матриці ПЗ відповідно (додаткова частина матриці ПЗ – стовпчики від $n+1$ -го до $2n$ -го).

i	1	2	3	...	n	$n+1$	$n+2$	$n+3$	...	$2n$
τ_i	τ_1	τ_2	τ_3	...	τ_n	τ_1	τ_2	τ_3	...	τ_n
I_i	I_1	I_2	I_3	...	I_n	I_1	I_2	I_3	...	I_n
σ_i	σ_1	σ_2	σ_3	...	σ_n	σ_1	σ_2	σ_3	...	σ_n
ψ_i	ψ_1	ψ_2	ψ_3	...	ψ_n	ψ_1	ψ_2	ψ_3	...	ψ_n

Етап 3. Визначення параметрів інтервальних вільних струмів.

Крок 3.1. Визначення матриці вільних інтервальних струмів Ф1.

Для визначення вільного струму на інтервалі використовуються формули, наведені в розділі 3. Формули враховують вплив усіх складових вільних струмів на усіх інтервалах. Для докладного аналізу роботи системи іноді доцільно визначити такі складові, тому запишемо формулу у вигляді

$$i_{V,i}(t) = -\frac{1}{P_S} \cdot \sum_{j=1}^n P_{V,ij} \cdot e^{-\sigma_j t}, \quad (\text{Д.1})$$

де $P_{V,ij}$ – складова, що визначає вільний струм внаслідок вплив i -го інтервалу роботи схеми (без урахування нескінченної кількості повторювань періодів роботи системи, тобто за інтервал попереднього періоду);

$$P_s = 1 - e^{-\left(\sum_{k=1}^n \sigma_i \tau_i\right)}. \quad (\text{Д.2})$$

Примітка: у разі роботи машинного алгоритму слід встановити доцільну точність розрахунків складових вільних струму, оскільки за великих значень j вільні струми можуть наближатися до нуля.

Відповідно елементи матриці Ф1 – $P_{V,ij}$, розмірність $n \times n$:

i	j	1	2	3	...	n
1		$P_{V,1,1}$	$P_{V,1,2}$	$P_{V,1,3}$	...	$P_{V,1,n}$
2		$P_{V,2,1}$	$P_{V,2,2}$	$P_{V,2,3}$	...	$P_{V,2,n}$
3		$P_{V,3,1}$	$P_{V,3,2}$	$P_{V,3,3}$	...	$P_{V,3,n}$
...	
n		$P_{V,n,1}$	$P_{V,n,2}$	$P_{V,n,3}$	...	$P_{V,n,n}$

Для отримання значень вільних струмів внаслідок впливу i -го інтервалу роботи схеми з урахуванням нескінченної кількості повторювань періодів роботи системи матрицю Ф1 необхідно поділити на P_s .

Крок 3.2. Визначення матриці параметрів вільних струмів Ф2.

Матриця параметрів вільних струмів містить параметри вільних струмів інтервалів відповідно до запису:

$$i_{V,i}(t) = -E_{X,i} \cdot e^{-\sigma_i t}, \quad (\text{Д.3})$$

де $E_{X,i}$ – початкова амплітуда вільного струму на i -му інтервалі роботи системи;

$$E_{X,i} = \frac{1}{P_s} \cdot \sum_{j=1}^n P_{V,ij}. \quad (\text{Д.4})$$

Матриця $\Phi 2$ має такий вигляд, при розмірності $n \times 1$:

i	1	2	3	...	n
$E_{X,i}$	$E_{X,1}$	$E_{X,2}$	$E_{X,3}$	...	$E_{X,n}$

Крок 3.3. Визначення параметрів інтервальних струмів.

Власне формули знаходження вільних та перехідних струмів для різних функцій докладно розглянуто у розділі 3.

Матриця параметрів інтервальних струмів $\Phi 3$ має такий вигляд, при розмірності $n \times 3$:

i	1	2	3	...	n
$\Phi 1_i$	$\Phi 1_1$	$\Phi 1_2$	$\Phi 1_3$	...	$\Phi 1_n$
$\Phi 2_i$	$\Phi 2_1$	$\Phi 2_2$	$\Phi 2_3$	...	$\Phi 2_n$
$\Phi 3_i$	$\Phi 3_1$	$\Phi 3_2$	$\Phi 3_3$	...	$\Phi 3_n$

Для розрахунку струмів на інтервалі необхідне зміщення початку координат за розрахунку струму на кожному наступному інтервалі таким чином, аби інтервал, на якому розраховується струм, починався з початку координат. Відповідно потребує корекції матриця $\Pi 3$: $\Pi_i \rightarrow \Pi_{i-1}$, перший стовпчик стає останнім.

Особливості використання алгоритму для розрахунку схем з функцією генератора різних типів.

Наведемо основні особливості використання алгоритму для розрахунку схем з різними функціями напруги генератора відповідно до прийнятих раніше позначень та табл. 3.1.

Тип 1 – функції рівня.

1. Функція напруги визначається лише одним параметром – амплітудою U_i .

2. Знаходження матриці початкових параметрів напруги $\Pi 1$.

Оскільки напруга у разі дії такої функції постійна на всьому інтервалі, то у

разі комутаціях типу 1–1, 1–0 відбувається зміна параметрів напруги (тут це лише амплітуда) відповідно до матриці початкових значень напруги; у разі комутацій типу 0–1 та 0–0 використовується значення попереднього інтервалу.

2. Формули, що визначають вільний та перехідний струми:

$$i_{V,i}(t) = -\frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \sigma_i \tau_i}} \cdot \left[I_{i-1+n} (1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-s+n}}) + \sum_{j=2}^n \left(I_{i-j+n} (1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\sigma_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} \right) \right], \quad (Д.5)$$

$$i_{P,i}(t) = \frac{U_i}{R_i} (1 - e^{-\sigma_i t}). \quad (Д.6)$$

3. Змінні $P_{V,ij}$ визначаються відповідно до формули таким чином:

1) якщо $j=1$, то

$$P_{V,ij} = I_{i-1+n} (1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}); \quad (Д.7)$$

2) якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = I_{i-j+n} (1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\sigma_{i-s+n} \tau_{i-s+n})}. \quad (Д.8)$$

4. Формула струму на інтервалі:

$$i_i(t) = \frac{U_i}{R_i} (1 - e^{-\sigma_i t}) + E_{X,i} \cdot e^{-\sigma_i t}. \quad (Д.9)$$

Тип 2 – синусоїдальні функції.

1. Функція напруги визначається частотою ω_i , амплітудою (тут йдеться про амплітуду синусоїди, від якої утворена функція, що не обов'язково збігається з амплітудою універсальної синусоподібної функції) U_i , значенням відсічення переднього фронту $\alpha_i = \omega_i \Delta t_i$ (тут Δt_i – відсічення переднього фронту в одиницях часу, якщо не наведено у радіанах)

2. Знаходження матриці початкових параметрів напруги П1.

У разі комутацій типу 0–1 та 0–0 частота та амплітуда синусоїди залишаються незмінними, змінюється лише значення відсічення переднього фронту α_i . Цей параметр знаходиться за такою формулою:

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \omega_i \tau_{i-1}. \quad (Д.10)$$

3. Формули, що визначають вільний та перехідний струми:

$$i_{V,i}(t) = -\frac{e^{-\alpha_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \alpha_i \tau_i}} \cdot \left[I_{i-1+n} (\sin(\alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n}) e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - \sin(\omega_{i-1+n} \cdot \tau_{i-1+n} + \alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n})) + \right. \\ \left. + \sum_{j=2}^n \left(I_{i-j+n} (\sin(\alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^j (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} - \sin(\omega_{i-j+n} \cdot \tau_{i-j+n} + \alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})}) \right) \right], \quad (\text{Д.11})$$

$$i_{P,i}(t) = I_i \cdot [\sin(\omega_i \cdot t + \alpha_i - \psi_i) - \sin(\alpha_i - \psi_i) \cdot e^{-\sigma_i t}]. \quad (\text{Д.12})$$

4. Змінні $P_{V,ij}$ визначаються відповідно до формули так:

3) якщо $j=1$, то

$$P_{V,i,1} = I_{i-1+n} (\sin(\alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n}) e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - \sin(\omega_{i-1+n} \cdot \tau_{i-1+n} + \alpha_{i-1+n} - \psi_{i-1+n})); \quad (\text{Д.13})$$

4) якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = I_{i-j+n} (\sin(\alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^j (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} - \sin(\omega_{i-j+n} \cdot \tau_{i-j+n} + \alpha_{i-j+n} - \psi_{i-j+n}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})}). \quad (\text{Д.14})$$

5. Формула струму на інтервалі:

$$i_i(t) = I_i \cdot [\sin(\omega_i \cdot t + \alpha_i - \psi_i) - \sin(\alpha_i - \psi_i) \cdot e^{-\sigma_i t}] + E_{X,i} \cdot e^{-\sigma_i t}. \quad (\text{Д.15})$$

Тип 3 – експоненціальні функції.

1. Функція напруги визначається амплітудою E_i (тут йдеться про різницю між значенням функції генератора на початку та в кінці інтервалу), коефіцієнтом спадання \mathcal{G}_i , що характеризує спадання власне базової експоненти, амплітудним зміщенням S_i (за розрахунку випадків комутації навантаження та незмінної експоненціальної напруги відбувається розбиття дії генератора відповідно спільних інтервалів).

2. Знаходження матриці початкових параметрів напруги П1.

У разі комутацій типу 0–1 та 0–0 коефіцієнт спадання залишається сталим, змінюються амплітуда та амплітудне зміщення. Розрахунок цих параметрів знаходиться за формулами (усі параметри з індексом l є параметрами l -го інтервалу – відповідно початкової матриці параметрів напруг):

– для зростаючої експоненціальної функції, тип 3,а:

$$E_i = \left[\frac{E_l}{1 - e^{-g_i \tau_i}} - E_{i-1} \right] [1 - e^{-g_i \tau_i}]; \quad (\text{Д.16})$$

$$S_i = S_{i-1} + E_{i-1}; \quad (\text{Д.17})$$

– для спадаючої експоненціальної функції, тип 3,б:

після комутації, наступної після комутації типу 1–0 чи 1–1:

$$E_i = \frac{E_l}{1 - e^{-g_i \tau_i}} [1 - e^{-g_i \tau_i}]; \quad (\text{Д.18})$$

$$S_i = E_l - \frac{E_l}{1 - e^{-g_i \tau_i}} [e^{-g_i \tau_i} - e^{-g_i \tau_i}]; \quad (\text{Д.19})$$

у інші випадки:

$$E_i = \frac{E_l}{1 - e^{-g_i \tau_i}} [e^{-g_{i-1} \tau_{i-1}} - e^{-g_i \tau_i}]; \quad (\text{Д.20})$$

$$S_i = S_{i-1} - E_{i-1}. \quad (\text{Д.21})$$

3. Формули, що визначають вільний та перехідний струми:

– для зростаючої експоненціальної функції, тип 3, а:

$$\begin{aligned} i_{V,i}(t) = & - \frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \sigma_k \tau_k}} \left[\frac{E_{i-1+n}}{(1 - e^{-g_{i-1+n} \tau_{i-1+n}})} \left[- \frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - e^{-g_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n} + g_{i-1+n} L} + \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} \right] + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} + \right. \\ & + \sum_{j=2}^n \left[\frac{E_{i-j+n}}{(1 - e^{-g_{i-j+n} \tau_{i-j+n}})} \left[- \frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - e^{-g_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n} + g_{i-j+n} L} + \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] + \right. \\ & \left. \left. + e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] \right]; \quad (\text{Д.22}) \end{aligned}$$

$$i_{P,i}(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-g_i \tau_i})} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-g_i t}}{R_i - g_i L} + \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i}; \quad (\text{Д.23})$$

– для спадаючої експоненціальної функції, тип 3,б:

$$\begin{aligned} i_{V,i}(t) = & - \frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \sigma_k \tau_k}} \left[\frac{E_{i-1+n}}{(1 - e^{-g_{i-1+n} \tau_{i-1+n}})} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - e^{-g_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n} + g_{i-1+n} L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}) e^{-g_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} \right] + \right. \\ & + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} + \sum_{j=2}^n \left[\frac{E_{i-j+n}}{(1 - e^{-g_{i-j+n} \tau_{i-j+n}})} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - e^{-g_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n} + g_{i-j+n} L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-g_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] + \right. \\ & \left. \left. + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] \right]; \end{aligned}$$

$$+ S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \left[e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})} \right]; \quad (\text{Д.24})$$

$$i_{P,i}(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[-\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-\vartheta_i t}}{R_i - \vartheta_i L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_i t}) e^{-\vartheta_i T}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i}. \quad (\text{Д.25})$$

4. Змінні $P_{V,ij}$ визначаються відповідно до формули так:

– для зростаючої експоненціальної функції, тип 3,а:

якщо $j=1$, то

$$P_{V,i,1} = \frac{E_{i-1+n}}{(1 - e^{-\vartheta_{i-1+n} \tau_{i-1+n}})} \left[-\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - e^{-\vartheta_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n} + \vartheta_{i-1+n} L} + \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} \right] + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}}; \quad (\text{Д.26})$$

якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = \left[\frac{E_{i-j+n}}{(1 - e^{-\vartheta_{i-j+n} \tau_{i-j+n}})} \left[-\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - e^{-\vartheta_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n} + \vartheta_{i-j+n} L} + \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] \times \\ \times e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})}; \quad (\text{Д.27})$$

– для спадаючої експоненціальної функції, тип 3,б:

якщо $j=1$, то

$$P_{V,i,1} = \frac{E_{i-1+n}}{(1 - e^{-\vartheta_{i-1+n} \tau_{i-1+n}})} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - e^{-\vartheta_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n} + \vartheta_{i-1+n} L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}) e^{-\vartheta_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} \right] + \\ + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}}; \quad (\text{Д.28})$$

якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = \left[\frac{E_{i-j+n}}{(1 - e^{-\vartheta_{i-j+n} \tau_{i-j+n}})} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - e^{-\vartheta_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n} + \vartheta_{i-j+n} L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-\vartheta_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] \times \\ \times e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})}. \quad (\text{Д.29})$$

5. Формула струму на інтервалі:

– для зростаючої експоненціальної функції, тип 3,а:

$$i_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-\vartheta_i \tau_i})} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-\vartheta_i t}}{R_i - \vartheta_i L} + \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + E_{X,i} \cdot e^{-\sigma_i t}; \quad (\text{Д.30})$$

– для спадаючої експоненціальної функції, тип 3,б:

$$i_i(t) = \frac{E_i}{(1 - e^{-g_i \tau_i})} \left[-\frac{e^{-\sigma_i t} - e^{-g_i t}}{R_i - g_i L} - \frac{(1 - e^{-\sigma_i t})e^{-g_i T}}{R_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + E_{x,i} \cdot e^{-\sigma_i t}. \quad (\text{Д.31})$$

Тип 4 – функції прямої пропорційності.

1. Функція напруги визначається амплітудою U_i (тут мається на увазі різниця між значенням функції генератора на початку та в кінці інтервалу), амплітудним зміщенням S_i (при розрахунку випадків комутації навантаження та незмінній роботі генератора відбувається розбиття дії генератора відповідно спільних інтервалів; у такому випадку $S_i = E_i \tau_{i-1}$).

2. Знаходження матриці початкових параметрів напруги П1.

При комутаціях типу 0–1 та 0–0 змінюється амплітуда та амплітудне зміщення. Розрахунок цих параметрів знаходиться за формулами:

– для функції типу 4,а:

$$E_i = \frac{E_l}{\tau_l} \tau_i; \quad (\text{Д.32})$$

$$S_i = S_{i-1} + E_{i-1}; \quad (\text{Д.33})$$

– для функції типу 4,б:

після комутації, наступної після комутації типу 1–0 чи 1–1:

$$E_i = \frac{E_l}{\tau_l} \tau_i; \quad (\text{Д.34})$$

$$S_i = E_l - \frac{E_l}{\tau_l} \tau_i; \quad (\text{Д.35})$$

у інші випадки:

$$E_i = \frac{E_l}{\tau_l} \tau_i; \quad (\text{Д.36})$$

$$S_i = S_{i-1} - E_{i-1}. \quad (\text{Д.37})$$

3. Формули, що визначають вільний та перехідний струми:

– для функції типу 4,а:

$$i_{v,i}(t) = -\frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-(\sum_{k=1}^n \sigma_i \tau_i)}} \left[\frac{E_{i-1+n}}{R_{i-1+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - 1}{\tau_{i-1+n} \sigma_{i-1+n}} + 1 \right] + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} + \right. \\ \left. + \sum_{j=2}^n \left[\frac{E_{i-j+n}}{R_{i-j+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - 1}{\tau_{i-j+n} \sigma_{i-j+n}} + 1 \right] + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})} \right]; \quad (\text{Д.38})$$

$$i_{p,i}(t) = \frac{E_i}{L \tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i}; \quad (\text{Д.39})$$

– для функції типу 4, б:

$$i_{v,i}(t) = -\frac{e^{-\sigma_i t}}{1 - e^{-(\sum_{k=1}^n \sigma_i \tau_i)}} \left[-\frac{E_{i-1+n}}{R_{i-1+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - 1}{\tau_{i-1+n} \sigma_{i-1+n}} + 1 \right] + (E_{i-1+n} + S_{i-1+n}) \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}} + \right. \\ \left. + \sum_{j=2}^n \left[-\frac{E_{i-j+n}}{R_{i-j+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - 1}{\tau_{i-j+n} \sigma_{i-j+n}} + 1 \right] + (E_{i-j+n} + S_{i-j+n}) \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})} \right]; \quad (\text{Д.40})$$

$$i_{p,i}(t) = -\frac{E_i}{L \tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + (E_i + S_i) \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i}. \quad (\text{Д.41})$$

4. Змінні $P_{V,ij}$ визначається відповідно формули таким чином:

для функції типу 4, а:

якщо $j=1$, то

$$P_{V,i,1} = \frac{E_{i-1+n}}{R_{i-1+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - 1}{\tau_{i-1+n} \sigma_{i-1+n}} + 1 \right] + S_{i-1+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}}; \quad (\text{Д.42})$$

якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = \left[\frac{E_{i-j+n}}{R_{i-j+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}} - 1}{\tau_{i-j+n} \sigma_{i-j+n}} + 1 \right] + S_{i-j+n} \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-j+n})}. \quad (\text{Д.43})$$

для функції типу 4, б:

якщо $j=1$, то

$$P_{V,i,1} = -\frac{E_{i-1+n}}{R_{i-1+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}} - 1}{\tau_{i-1+n} \sigma_{i-1+n}} + 1 \right] + (E_{i-1+n} + S_{i-1+n}) \frac{1 - e^{-\sigma_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}}{R_{i-1+n}}; \quad (\text{Д.44})$$

якщо $j>1$, то

$$P_{V,ij} = \left[-\frac{E_{i-j+n}}{R_{i-j+n}} \left[\frac{e^{-\sigma_{i-j+n}\tau_{i-j+n}} - 1}{\tau_{i-j+n}\sigma_{i-j+n}} + 1 \right] + (E_{i-j+n} + S_{i-j+n}) \frac{1 - e^{-\sigma_{i-j+n}\tau_{i-j+n}}}{R_{i-j+n}} \right] e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n}\tau_{i-s+n})}. \quad (\text{Д.45})$$

5. Формула струму на інтервалі:

для функції типу 4, а:

$$i_i(t) = \frac{E_i}{L\tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + S_i \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + E_{Xi} \cdot e^{-\sigma_i t}; \quad (\text{Д.46})$$

для функції типу 4, б:

$$i_i(t) = -\frac{E_i}{L\tau_i} \left[\frac{e^{-\sigma_i t} - 1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_i} \right] + (E_i + S_i) \frac{1 - e^{-\sigma_i t}}{R_i} + E_{Xi} \cdot e^{-\alpha_i t}. \quad (\text{Д.47})$$

Особливості використання алгоритму для розрахунку схем з складними функціями генератора.

При дослідженнях ЕТК-Smart виникають випадки, коли необхідно дослідити реакцію складних функцій генератора, що утворюються різними видами простих функцій одночасно: синусоїдою та ступінчатою, експонентою та похилою тощо. Тому важливо мати можливість здійснення таких розрахунків. Окремим випадком є часткова модуляція сигналу генератора. Схожий випадок – одночасна дія кількох генераторів на навантаження.

Єдиним додатковим елементом у алгоритмі додано при формуванні матриці початкових параметрів напруги П1: додано випадок комутації типу 0–0, коли відсутня комутація як генератора, так і навантаження. Це здійснено для врахування тих випадків, коли у одному з віртуальних генераторів відбувається комутація, а в іншому – ні. Для розрахунку схем з модульовано змінюваними параметрами до розглянутого алгоритму необхідно на початку додати блок визначення початкових параметрів схем відповідно до функцій модуляції. Випадки суміщення кількох типів модуляції одночасно можуть бути розраховані шляхом одночасної зміни кількох модульованих параметрів; часткова, або багатозонна модуляція може бути розрахована згідно принципу накладання кількох функціями.

Модуляція інших параметрів напруги може відбуватися по визначеному закону; однак, як і імпульсна модуляція, є лише способом заповнення матриць початкових параметрів напруги та опору. Окремі параметри модуляційних функцій також можуть залежати від вихідних характеристик через зворотній зв'язок у розрахунках: наприклад, коли тривалість імпульсу залежить від значення діючого або середнього струму, якого треба досягти.

ДОДАТОК Е
ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАКТИЧНУ ЗНАЧИМІСТЬ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ



**Міністерство розвитку економіки,
торгівлі та сільського господарства України**

Оригіналом цього документа є електронний документ з ідентифікатором:

CR0014300920

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Перейти за посиланням: <https://sis.ukrpatent.org>
2. Обрати пункт меню «СЕРВІСИ» «Отримати оригінал документу».
3. Вказати ідентифікатор документу та натиснути на кнопку «Завантажити».

Цей ідентифікатор є конфіденційною інформацією,
не повідомляйте його нікому

100081

Заявка № 101386
Вик. Васьонін Д. О.
Тел. 596-67-58

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник управління транспорту,
транспортної інфраструктури та
зв'язку Чернігівської міської ради
м. Чернігів



Рижий О. М.

2021р.

А К Т

впровадження (використання) результатів дисертаційної роботи Мельничука Григорія Валерійовича

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Мельничука Г.В. за напрямком досліджень та темою «Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів» було використано при розробці та обґрунтуванні плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту м. Чернігів у 2017 році під час реалізації проекту USAID «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту м. Чернігів».

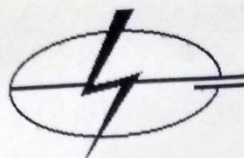
Особливо важливими, як в теоретичному так і в практичному плані вважаємо наступні результати:

- розроблене методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи в електротехнічних Smart-комплексах, яке широко використовувалося при проведенні електротехнологічного обстеження;
- здійснена оцінка втрат внаслідок дії періодичних завад у електромережі тягових підстанцій.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Заступник начальника управління –
начальник відділу електротранспорту,
зв'язку та безпеки дорожнього руху

Сікач Н. М.



ЕЛЕКТРОСФЕРА

Товариство з обмеженою відповідальністю
03039, Київ-39, вул. Грінченка, 18

ELECTROSPHERE, Ltd.

Kyiv-39, Ukraine

Тел./ факс: (044) 502-47-30, 502-47-31

E-mail: electro@electrosphere.com.ua

№ 549/03 від 12 лютого 2021 р.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи Г.В. Мельничука «Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи навантажень електротехнічних комплексів Smart-технологій»

Цей акт засвічує те, що Мельничуком Григорієм Валерійовичем в рамках дисертаційного дослідження на тему «Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів» розроблено програмний пакет, який дозволяє здійснювати розрахунки та аналіз характеристик електротехнічних комплексів, що містять в собі електричні схеми з періодично змінюваними параметрами.

Зазначений програмний пакет було застосовано при аналізі стаціонарних режимів роботи навантажень в електротехнічних комплексах з конденсаторними пристроями компенсації реактивної потужності та напівпровідниковими перетворювачами електроенергії. Розроблений програмний пакет надалі може бути використано також для аналізу електромагнітної сумісності засобів компенсації реактивної потужності в умовах погіршення якості електроенергії у відповідних промислових електротехнічних комплексах.

Цей Акт не є підставою для будь-яких фінансових зобов'язань або претензій..

Генеральний директор
ТОВ «Електросфера»,
канд. техн. наук, с. н. с.



Ю. П. Зубюк

INTERPROJEKT

GmbH

Акт впровадження
результатів дисертаційної роботи Г.В. Мельничука

«Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи навантажень
електротехнічних комплексів Smart-технологій»

Цей акт засвічує те, що Мельничуком Григорієм Валерійовичем при виконанні дисертаційного дослідження на тему *«Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart- комплексів»* в рамках розроблення концепції запровадження технологій SmartGrid розроблено пропозиції щодо підвищення енергоефективності функціонування електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення водоканалів.

Зазначені пропозиції застосовано при аналізі тенденцій запровадження положень концепції SmartGrid для енергозабезпечення локальних електротехнічних комплексів водоканалів, зокрема, у віддалених населених пунктах, в умовах нестабільного енергопостачання та при використанні додаткових джерел енергії, у тому числі сонячних та вітрогенераторних установок.

Зазначені пропозиції можуть бути також використані для інтеграції електротехнічних комплексів електроживлення систем водопостачання до єдиної інтелектуальної системи керування комунальним господарством відповідно до положень концепції SmartCity.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Генеральний директор
ТОВ «Інтерпроект GmbH»


Кунь І.П.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського»,
канд. філос.-наук, доц.,
Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО
2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача кафедри електропостачання
Мельничука Г.В. у навчальний процес КПП ім. Ігоря Сікорського

Ми, що нижче підписалися, голова методичної комісії ІЕЕ КПП ім. Ігоря Сікорського А.Л. Ган, завідувач кафедри електропостачання В.А. Попов, заступник завідувача кафедри електропостачання з наукової роботи О.В. Коцар склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Мельничука Григорія Валерійовича «Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів» використовуються у навчальному процесі Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПП ім. Ігоря Сікорського на кафедрі електропостачання.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження та досягнутий фактичний ефект
Розширення методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, аналітичні вирази для моделювання та аналізу періодичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, а також аналізу завод та інтегральних характеристик таких систем.	Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у вигляді лекційних матеріалів при викладанні дисциплін «Промислова електроніка», «Силова електроніка в системах електропостачання», «Системи сигової електроніки та засоби керування в електроенергетиці», програмно-алгоритмічного забезпечення, методичних вказівок «Основи сигової електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink» / Уклад.: С.П. Декнісюк, Д.Г. Дерев'янка, Г.В. Мельничук. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 72 с.

Заступник завідувача кафедри
електропостачання з наукової роботи,
к.т.н., доц.

Завідувач кафедри
електропостачання, д.т.н.

Голова методичної комісії ІЕЕ
к.т.н., доц.

Олег КОЦАР

Володимир ПОПОВ

Анатолій ГАН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи
Національного технічного
університету України

«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

канд. філос. наук, доц.

Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО

2021 р.



ДОВІДКА

про використання у науково-дослідній роботі кафедри електропостачання
КПІ ім. Ігоря Сікорського результатів дисертаційної роботи
Мельничука Григорія Валерійовича
«Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних
Smart-комплексів»

Цим засвідчуємо, що на кафедрі електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при виконанні бюджетних НДР у рамках науково-дослідних робіт «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (номер державної реєстрації: 0117U004285) були використані наступні матеріали дисертаційної роботи Мельничука Г.В.:

1. Методологічне забезпечення розрахунку ustalених режимів у системах з перетворювачами електроенергії.
2. Програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart-комплексів при дії періодичних завад;
3. Методичне забезпечення здійснення експрес-аналізу при проведенні електротехнічного обстеження (енергоаудиту) Smart-електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами генераторів та навантажень.

Завідувач кафедри
електропостачання, д.т.н., доц.

Володимир ПОПОВ

Голова методичної комісії ІЕЕ
к.т.н., доц.

Анатолій ГАН